



## 저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학박사 학위논문

자화 유도 결합 플라즈마를 이용한  
이온 빔 식각 장치 설계 및 MTJ layer  
물질들의 식각 특성에 관한 연구

Design of Ion Beam Etcher applying Magnetized  
Inductively Coupled Plasma and a Study on  
etch characteristics of MTJ layer materials

2017 년 8 월

서울대학교 대학원

전기 컴퓨터 공학부

김 지 원

## 초 록

최근에 전자 산업이 발달함에 따라 전자 기기들 막대한 정보를 처리할 뿐만 아니라 저장하는 기능이 요구되고 있다. 이러한 추세에 따라서 앞으로 사용될 메모리는 빠른 스피드와 대용량, 낮은 파워 소비와 비휘발성의 특징이 필수적으로 요구된다. 그러나 현재 가장 널리 사용되고 있는 DRAM 과 flash 메모리는 한계성을 가지고 있으므로 이를 대체할 새로운 메모리 소자인 PRAM, MRAM, ReRAM 등의 연구가 지속되고 있다. 새롭게 개발중인 다양한 메모리 소자중에서도 특히 STT-MRAM 은 high density, high speed, low power consumption, non-volatile 등의 다양한 장점을 가지고 있다. 그래서, STT-MRAM 은 컴퓨터 구조의 메모리 hierarchy 구조를 바꿀 수 있는 잠재적인 가능성을 가지고 있다고 볼 수 있다. 이러한 이유로 궁극의 메모리라고 불리고 있는 STT-MRAM 의 개발을 위해 MTJ layer 물질들의 최적화에 대한 연구, 전기적 특성에 대한 연구, MTJ layer 식각 공정에 대한 연구등이 진행되고 있다. STT-MRAM 에 대한 다양한 연구 중에서도 본 논문은 식각 공정에 초점을 맞춰 연구를 진행하였다. STT-MRAM 에서 read/writhe 의 핵심역할을 하는 것은 MTJ layer 로써 CoFeB, W, Ru, Ta, FePt, TiN 등의 다양한 금속물질들로 구성이 되어있다. 일반적인 RIE type 식각 장비에서는 식각후에 생기는 byproducts 들이 측면에 붙게 된다. 이처럼 식각된 물질들이 패턴의 sidewall 에 redeposition 되는 현상으로 인해 소자는 동작하지 않게 되며 이를 해결하는 것이 가장 큰 이슈이다. 이를 해결하고자 기존의 RIE type 식각 장치가 아닌, ion beam etcher (IBE) 를 사용하여 패턴 식각에 대한 연구가 지속되고 있다. 그러나 IBE 는 낮은 식각률로 인해 패턴 식각에 오랜시간이 걸리고 이온에너지와 식각률을 독립적으로 제어할 수 없으며 식각 균일도 또한 좋지 않아 양산화에 어려움을 겪고 있다.

본 논문에서는 기존의 IBE 에서의 단점을 해결하고자 다양한 연구들이 진행되었다. 우선, 낮은 etch rate 의 문제점과 이온에너지와 ion flux 를 독립적으로 제어하기 위해, 자화 유도 결합 플라즈마 소스를 이용하여 새롭게 이온 빔 식각 장치를 설계하였다. 자화 유도 결합 플라즈마는 특정 조건을 만족할 때 R-wave 가 전파되며 이로 인해 고밀도 플라즈마를 형성할 수 있는 특징을 가지고 있다. 이에 대한 설계를 위해서는 전자석의 위치와 자기장의 구배 및 크기가 중요한데 상용 소프트웨어인 FEMM 을 이용하였다. MICP-IBE 의 설계를 한 후에 자기장, 소스파워, 그리드 전압 등의 가변에 따라 플라즈마의 방전특성 및 이온 빔의 특성에 대하여 살펴보았다. 자기장의 가변에

따라 플라스마 밀도는 증가하는 것으로 측정되나, R-wave 로 인한 방전 mechanism 으로 인하여 특수한 조건에서 maximum 의 플라스마 밀도를 가지는 것을 확인 할 수 있었다. 플라스마 밀도와 전자온도의 증가에 따라 ion flux 또한 증가하는 것을 확인 할 수 있었다. 소스파워가 증가할때는 플라스마 밀도가 지속적으로 증가하지만, ion flux 는 특정 소스파워에서 maximum 값을 가지는 것을 확인하였다. 이는 플라스마 밀도와 스크린 그리드에서 형성되는 sheath 모양과의 관계에 따른 것으로써 적절하게 sheath 가 형성되어야만 beam focus 가 원활하게 되는 것임을 확인하였다. Screen grid 와 Acceleration grid 의 절대적인 전압 차이에 의해서도 sheath 두께와 모양이 결정되기 때문에 인가되는 그리드 전압역시도 매우 중요하다. 다시 말하면, 그리드 전압의 크기는 최적의 ion beam 의 효율을 극대화 시키기 위해 매우 중요한 요소이며, screen grid 와 acceleration grid 는 ion energy 와 ion flux 를 각각 제어하게 된다.

본 연구에서는 새로운 MICP-IBE 의 설계뿐만 아니라 균일도 특성 개선에 대한 연구도 진행하였다. 우선, 자기장의 구배를 다양화 시키기 위하여 전자석을 추가적으로 셋업을 하였다. 플라스마 밀도, ion flux, etch rate 의 non-uniformity value 를 다양한 자기장 구배 조건에서 모두 측정하였다. 플라스마 내에서 flute instability 현상이 억제되는 특성이 만족되어야만 균일도 특성이 향상되는 것으로 확인되어졌다. 그러나, 자기장의 구배를 flute instability 를 억제하는 조건으로써 균일도를 개선하는 것에는 한계점을 보이고 있었다. 이러한 관점에서 추가적으로 균일도 특성을 개선을 하기 위하여 그리드의 반경방향이 증가함에 따라 그리드 구멍의 밀도가 증가하는 형태의 새로운 그리드를 새롭게 설계하였다. 그리드 구멍의 밀도가 균일한 Conventional grid 와 반경방향에 따라 구멍의 밀도가 다른 proposed grid 를 사용하여 ion flux 와 etch rate 균일도 특성에 대한 실험이 진행되었다. CoFeB 물질의 non-uniformity values 를 측정하였을 경우, proposed grid 를 사용할 경우가 (11.65%) conventional grid 를 사용할 경우 (17.50%) 보다 더 낮은 것을 확인 할 수 있었다.

한 편, MTJ layer 를 구성하는 다양한 물질들의 식각 특성도 살펴보았다. CoFeB, Ta, TiN, W, SiO<sub>2</sub> 등의 물질들을 line and space 패턴을 가지는 샘플로 직접 만들었으며 각 물질들을 기존의 RIE type etcher 와 새롭게 설계한 MICP-IBE 에서 식각 실험을 진행하였다. 기존의 RIE type etcher 에서는 MICP 식각 장치와 ICP 의 식각 장치에서의 식각 특성이 비교되었다. 특히, facet 각도 차이가 상이하게 측정되었는데 각도 특성을 분석해 본 결과, MICP 식각 장치가 패턴 측면에 재증착되는 물질들을 감소시키는 것에 유리하다는 것을 확인 할 수 있었다. 그러나, 완벽하게 제거하는 것은 불가능하였고 이에 대한 특성을 살펴보고자 앞서 설계된 MICP-IBE 를 이용하여 식각 실험을 진행하였다. 기본적으로 이온에너지 가변에 따른 식각특성을 살펴보고 측면에 재증착되는

물질들을 제거하기 위하여 기판의 tilt angle 변화에 따른 식각 특성 또한 살펴보았다. 기판의 tilt 변화에 따라 etch rate 도 변화하였으며 maximum 값을 가지는 것을 확인할 수 있었고 측면에 재증착된 물질이 제거되는 현상 또한 확인 할 수 있었다.

주요어 : MICP-IBE (Magnetized Inductively Coupled Plasma Ion Beam Etcher), IED (Ion Energy Distribution), Ion flux, Etch rate, Uniformity, MTJ (Magnetic tunneling junction)

학번 : 2012-20759

# 목 차

제 1 장 서 론 .....	1
1.1 연구의 배경 및 목적 .....	1
1.2 논문의 구성 .....	5
제 2 장 플라즈마 식각 장치 및 이온 빔 식각 장치.....	7
2.1 반도체 분야의 플라즈마 식각 응용.....	7
2.2 다양한 플라즈마 소스를 이용한 플라즈마 식각 장치 .....	9
2.2.1 플라즈마 식각 장치의 종류.....	9
2.2.2 용량 결합 플라즈마 (CCP) 장치의 원리.....	16
2.2.3 유도 결합 플라즈마 (ICP) 장치의 원리 .....	20
2.2.4 자화 유도 결합 플라즈마 (M-ICP) 장치의 원리 .....	25
2.3 다양한 플라즈마 소스를 이용한 이온 빔 식각 장치 .....	30
2.3.1 이온 빔 식각 장치 구조와 특징.....	30
2.3.2 다양한 플라즈마 소스의 이온 빔 식각 장치 종류.....	34
2.3.3 이온 빔 식각 장치를 이용한 선행 연구.....	37
제 3 장 M-ICP 이온 빔 식각 장치 설계 및 방전 특성.....	41
3.1 M-ICP 이온 빔 식각 장치 구성 및 전자석 설계 .....	43
3.1.1 FEMM 시뮬레이션을 이용한 전자석 모델링 .....	43
3.1.2 M-ICP 이온 빔 식각 장치의 구성 .....	46
3.2 자기장 최적화 설계.....	49
3.2.1 자기장 최적화와 관련된 이론 및 선행 연구.....	49
3.2.2 전류 인가 조건에 따른 자기장의 공간 분포 변화.....	53
3.3 자기장 가변에 따른 방전 및 ion beam flux 특성 .....	60
3.3.1 Langmuir probe를 이용한 플라즈마 진단.....	60
3.3.2 Ion energy analyzer를 이용한 ion beam flux 측정 .....	63
3.3.3 자기장 세기에 따른 방전 특성.....	69
3.3.4 자기장 세기에 따른 ion beam flux 특성.....	74
3.4 RF power 가변에 따른 방전 및 ion beam flux 특성 .....	79
3.4.1 RF power 가변에 따른 방전 특성.....	79
3.4.2 RF power 가변에 따른 ion beam flux 특성.....	82
3.5 IBE 그리드의 sheath 형성과 ion beam flux의 상관관계 .....	87
3.5.1 그리드의 쉬스 형성 원리 및 이론.....	87
3.5.2 Screen grid 전압에 따른 ion beam flux 특성 .....	90
3.5.3 Accelerator grid 전압에 따른 ion beam flux 특성.....	93
3.6 요약 및 향후 과제.....	96

<b>제 4 장 M-ICP 이온 빔 식각 장치의 균일도 특성</b>	<b>98</b>
4.1 자기장 구배와 균일도의 상관관계에 관한 선행 연구	99
4.2 전자석 전류 인가 조건에 따른 자기장의 공간 분포	101
4.3 자기장 구배에 따른 균일도 특성	105
4.3.1 플라즈마 밀도 및 전자온도 균일도 특성	105
4.3.2 Ion beam flux 의 균일도 특성	110
4.3.3 식각 균일도 특성	116
4.4 그리드 구멍의 밀도 분포에 따른 균일도 특성	121
4.4.1 그리드 구멍의 밀도 분포의 설계	121
4.4.2 Ion beam flux 의 균일도 특성	125
4.4.3 식각 균일도 특성	139
4.5 요약 및 향후 과제	133
<b>제 5 장 MTJ layer 구성 물질들의 식각 특성</b>	<b>135</b>
5.1 차세대 뉴 메모리 개발 현황 및 종류	136
5.2 STT-MRAM의 구조 및 동작 원리	139
5.3 MTJ layer 식각 선행연구	143
5.4 Sputter yield 시뮬레이션	147
5.5 식각 실험에 사용된 line pattern 샘플 제작	153
5.6 ICP 및 M-ICP 플라즈마 식각 장치의 식각 특성	155
5.6.1 Facet 형성과 redeposition 의 관계	155
5.6.2 ICP 플라즈마 식각 장치의 facet 및 식각 특성	159
5.6.3 M-ICP 플라즈마 식각 장치의 facet 및 식각 특성	168
5.6.4 MTJ layer 구성물질들의 식각 특성 비교	178
5.6.5 RIE type 식각 장치의 한계성	180
5.7 M-ICP 이온 빔 식각 장치의 식각 특성	182
5.7.1 이온 에너지에 변화에 따른 식각 특성	182
5.7.2 기판 tilt 각도 변화에 따른 식각 특성	188
5.8 요약 및 향후 과제	192
<b>제 6 장 결론</b>	<b>195</b>
<b>참고 문헌</b>	<b>200</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>208</b>

## 표 목차

[표 3.2.1] 시뮬레이션으로 얻어진 전류 인가 조건에 따른 자기장 크기 .....	54
[표 4.2.1] 자기장 구배에 따른 전자석에 흘리는 전류 인가 조건 .....	102



# 그림 목차

[그림 1.1.1] 플라스마의 분류 .....	2
[그림 2.1.1] 습식 식각과 건식 식각의 방향성 .....	7
[그림 2.2.1] 공정압력과 플라스마 밀도에 따른 플라스마 식각 장치의 분류.....	9
[그림 2.2.2] RIE etcher (CCP) 의 구조.....	10
[그림 2.2.3] MERIE etcher 의 구조.....	11
[그림 2.2.4] ECR etcher 의 구조.....	12
[그림 2.2.5] Helicon plasma etcher 의 구조 .....	13
[그림 2.2.6] Inductively coupled plasma etcher 의 구조.....	14
[그림 2.2.7] Magnetized inductively coupled plasma etcher 의 구조 .....	15
[그림 2.2.8] CCP etcher의 개념도 .....	16
[그림 2.2.9] RF 가 sine wave 인 경우 $V_a$ 와 $V_b$ .....	18
[그림 2.2.10] 다른 전극에 각각 RF 를 인가하는 CCP type.....	19
[그림 2.2.11] 같은 전극에 RF 를 두개 이상 인가하는 CCP type .....	19
[그림 2.2.12] 평판형 type 유도 결합 플라스마 식각 장치의 개념도.....	20
[그림 2.2.13] 실린더 type 유도 결합 플라스마 식각 장치의 개념도.....	21
[그림 2.2.14] 유도 결합 플라스마의 전기적 등가 회로 .....	23
[그림 2.2.15] M-ICP 내의 wave dispersion relation.....	27
[그림 2.2.16] 전기장의 방향 변화와 전자 가속의 차이 .....	28
[그림 2.3.1] 이온 빔 식각 장치의 개념도.....	30
[그림 2.3.2] Three grid 구조의 모습 .....	32
[그림 2.3.3] Accelerator system potential variation .....	32
[그림 2.3.4] Screen grid 모양과 beam divergence 관계 .....	33
[그림 2.3.5] 필라멘트 타입의 소스를 이용한 이온 빔 식각 장치 .....	34
[그림 2.3.6] ICP 타입의 소스를 이용한 이온 빔 식각 장치 .....	35

[그림 2.3.7] ECR 타입의 소스를 이용한 이온 빔 식각 장치 .....	36
[그림 2.3.8] 그리드의 기하학적인 변화를 통한 실험 설계.....	38
[그림 2.3.9] 기판 tilt 와 rotation 이 가능한 이온 빔 식각 장치 .....	39
[그림 2.3.10] 이온 빔 식각 장치의 일반적인 beam 분포.....	40
[그림 3.1.1] 유한 요소법을 이용한 domain 근사화.....	43
[그림 3.1.2] FEMM 을 이용한 M-ICP 이온 빔 식각 장치의 모델링 .....	44
[그림 3.1.3] M-ICP 이온 빔 식각 장치의 schematic design .....	46
[그림 3.1.4] M-ICP 이온 빔 식각 장치의 3-D 외형.....	48
[그림 3.2.1] 자기장의 gradient 에 의한 drift .....	49
[그림 3.2.2] Charge separation 으로 인해 형성된 $\vec{E}$ 와 $\vec{E} \times \vec{B}$ drift.....	50
[그림 3.2.3] Flute instability 발생 과정 .....	50
[그림 3.2.4] 전자석 설치 위치 .....	53
[그림 3.2.5] 100mA, 200mA, 300mA 조건의 FEMM 결과 .....	55
[그림 3.2.6] 400mA, 500mA, 600mA 조건의 FEMM 결과 .....	55
[그림 3.2.7] 700mA, 800mA, 900mA 조건의 FEMM 결과 .....	56
[그림 3.2.8] 반경 방향이 증가함에 따라 생기는 자장 분포(100~400mA).....	57
[그림 3.2.9] 반경 방향이 증가함에 따라 생기는 자장 분포(500~900mA).....	57
[그림 3.2.10] 수직축 방향에 따라 생기는 자장 분포(100~400mA).....	58
[그림 3.2.11] 수직축 방향에 따라 생기는 자장 분포(500~900mA).....	58
[그림 3.2.12] 시뮬레이션 결과와 실제 측정된 자기장 크기 비교.....	59
[그림 3.3.1] DLP 측정 결과 얻는 V-I curve.....	61
[그림 3.3.2] 이온 에너지 분석기의 구성 및 원리 .....	64
[그림 3.3.3] 연구실에서 제작한 이온 에너지 분석기 .....	65
[그림 3.3.4] 측정을 통해 얻은 V-I curve.....	68
[그림 3.3.5] V-I curve 를 미분하여 얻은 이온 에너지 분포 함수.....	68
[그림 3.3.6] 연구실에서 제작한 double Langmuir probe .....	69

[그림 3.3.7] Double Langmuir probe 의 feed through.....	70
[그림 3.3.8] Discharge chamber 옆면에 DLP 가 설치된 모습 .....	71
[그림 3.3.9] 자기장 변화에 따른 플라스마 밀도와 전자온도.....	72
[그림 3.3.10] 자기장 크기에 따른 R-wave 파장 길이 .....	73
[그림 3.3.11] Substrate 에 놓여진 ion energy analyzer.....	74
[그림 3.3.12] 자기장 가변에 따른 ion energy distribution function.....	76
[그림 3.3.13] 자기장 가변에 따른 ion flux 변화.....	76
[그림 3.3.14] 자기장 가변에 따른 그리드에 흐르는 전류 변화.....	77
[그림 3.4.1] 소스파워 가변에 따른 플라스마 밀도 및 전자온도.....	80
[그림 3.4.2 (a)] 파워 가변에 따른 플라스마 밀도와 전자온도.....	81
[그림 3.4.2 (b)] 파워 가변에 따른 $I_N$ 과 $I_{N2}$ 측정 결과.....	81
[그림 3.4.3] RF power 변화에 따른 ion energy distribution function.....	82
[그림 3.4.4] RF power 변화에 따른 ion flux 측정 결과 .....	83
[그림 3.4.5] 플라스마 밀도 증가에 따른 sheath 와 ion beam 궤적 변화.....	84
[그림 3.4.6] RF power 가변에 따른 그리드 전류 변화 .....	85
[그림 3.5.1] 그리드에서 sheath 형성 모습.....	88
[그림 3.5.2] 두 그리드 사이의 전압 증가로 인한 sheath 의 형태 변화.....	89
[그림 3.5.3] Screen grid voltage 가변에 따른 IEDA 변화.....	91
[그림 3.5.4] Screen grid voltage 가변에 따른 ion flux 변화.....	91
[그림 3.5.5] Screen grid voltage 가변할 때 흐르는 그리드 전류 .....	92
[그림 3.5.6] Accelerator grid voltage 가변에 따른 IEDA 변화.....	93
[그림 3.5.7] Accelerator grid voltage 가변에 따른 ion flux 변화.....	94
[그림 3.5.8] Accelerator grid voltage 가변에 따른 그리드 전류 변화 .....	94
[그림 4.1.1] ICP 와 자장의 분포에 따른 밀도 분포 결과.....	100
[그림 4.1.2] ICP 및 M-ICP 에서 oxide 식각 속도의 non-uniformity .....	100
[그림 4.2.1] 세 개 전자석 설치 위치.....	101

[그림 4.2.2] 반경 방향 위치에 따른 자기장 크기 .....	103
[그림 4.2.3] 수직축 방향 위치에 따른 자기장 크기 .....	103
[그림 4.3.1] 반경방향이 증가함에 따른 플라즈마 밀도 측정결과.....	106
[그림 4.3.2] 반경방향이 증가함에 따른 전자온도 측정결과.....	106
[그림 4.3.3] 자기장 구배에 따른 플라즈마 밀도의 불균일도 수치 비교 .....	109
[그림 4.3.4] ICP 조건에서 반경방향 위치에 따른 IED 측정결과.....	111
[그림 4.3.5] Case 1 조건에서 반경방향 위치에 따른 IED 측정결과 .....	111
[그림 4.3.6] Case 2 조건에서 반경방향 위치에 따른 IED 측정결과 .....	112
[그림 4.3.7] Case 3 조건에서 반경방향 위치에 따른 IED 측정결과 .....	112
[그림 4.3.8] Case 4 조건에서 반경방향 위치에 따른 IED 측정결과 .....	113
[그림 4.3.9] 반경방향 위치에 따른 ion flux 측정결과 .....	114
[그림 4.3.10] 자기장 구배에 따른 ion flux 불균일도 수치 비교.....	115
[그림 4.3.11] 식각 전 CoFeB sample.....	116
[그림 4.3.12 (a)] 기관 중앙 위치 (0mm) .....	118
[그림 4.3.12 (b)] 가장자리 (50mm) 에서의 식각 후 SEM image .....	118
[그림 4.3.13] 반경방향 위치에 따른 etch rate 측정결과 .....	119
[그림 4.3.14] 자기장 구배에 따른 etch rate 불균일도 수치 비교.....	120
[그림 4.4.1] 균일한 구멍 분포를 가지는 conventional grid 모습 .....	121
[그림 4.4.2] 구멍 밀도의 차이에 따른 그리드 설계 도면.....	123
[그림 4.4.3] 새롭게 제작된 불균일 hole density 를 가지는 그리드 .....	124
[그림 4.4.4] Proposed grid 사용시에 반경방향 위치에 따른 IEDA .....	126
[그림 4.4.5] 반경방향 위치에 따른 ion flux.....	127
[그림 4.4.6] 그리드 종류에 따른 ion flux 불균일도 수치 비교.....	128
[그림 4.4.7] 반경방향 위치에 따른 식각 후 SEM image .....	130
[그림 4.4.8] 반경방향 위치에 따른 etch rate 측정결과 .....	131
[그림 4.4.9] 그리드 종류에 따른 etch rate 불균일도 수치 비교.....	132

[그림 5.1.1] 컴퓨터의 구조 .....	136
[그림 5.1.2] Hierarchy 메모리 구조.....	137
[그림 5.1.3] 다양한 메모리 종류 .....	138
[그림 5.2.1] STT-MRAM 의 기본적인 구조.....	139
[그림 5.2.2] MTJ layer 구성물질 .....	140
[그림 5.2.3] 멀티 레벨 신호를 가지는 MTJ layer 구조.....	141
[그림 5.3.1] RIE type etcher 에서 일어나는 다양한 식각 원리 .....	143
[그림 5.3.2] CoFeB 와 TiN 을 thin film 형태로 적층 후 식각 한 모습 .....	144
[그림 5.3.3] 순수한 Ar 플라즈마로 RIE etcher 에서 식각 후 모습 .....	145
[그림 5.3.4] 기판 tilt 에 따른 식각 후 profile 차이 .....	146
[그림 5.4.1] SRIM 시뮬레이션이 실행된 모습 .....	147
[그림 5.4.2] 입사각에 따른 다양한 물질들의 sputter yield (100eV).....	149
[그림 5.4.3] 입사각에 따른 다양한 무질들의 sputter yield (500eV).....	149
[그림 5.4.4] 입사각에 따른 다양한 물질들의 spuuter yield (1000eV).....	150
[그림 5.4.5] 입사각에 따른 다양한 금속 물질들의 sputter yield(100eV).....	150
[그림 5.4.6] 입사각에 따른 다양한 금속 물질들의 sputter yield(500eV).....	151
[그림 5.4.7] 입사각에 따른 다양한 금속물질들의sputter yield(1000eV).....	151
[그림 5.5.1] Line pattern 샘플 제작하는 과정 .....	153
[그림 5.5.2] Line pattern 샘플의 완성된 모습 .....	154
[그림 5.6.1] 식각 후 생기는 facet formation .....	155
[그림 5.6.2] 식각 후 생기는 다양한 facet 형태 및 각도 .....	155
[그림 5.6.3] Facet 형성 과정.....	156
[그림 5.6.4] Facet을 가지는 mask로 인해 생기는 byproduct 궤적 .....	157
[그림 5.6.5] 입사각에 따른 sputtered atom 들의 분포 .....	158
[그림 5.6.6] ICP 플라즈마 식각 장치와 주변에 설치된 전자석 coils.....	159
[그림 5.6.7] 식각에 사용되는 샘플의 측면 모습 .....	160

[그림 5.6.8] ICP 식각 장치에서의 facet evolution I .....	161
[그림 5.6.9] ICP 식각 장치에서의 facet evolution II.....	162
[그림 5.6.10] ICP 식각 장치에서의 facet evolution III .....	163
[그림 5.6.11] ICP 식각 장치에서의 facet evolution IV .....	164
[그림 5.6.12] 식각 시간에 따른 facet angle 의 변화.....	165
[그림 5.6.13] RF bias power 가변에 따른 etch rate 측정결과 .....	166
[그림 5.6.14] RF bias power 가변에 따른 IEDA.....	167
[그림 5.6.15] RF bias power 가변에 따른 ion flux 측정 결과 .....	167
[그림 5.6.16] M-ICP 식각 장치에서의 facet evolution I .....	169
[그림 5.6.17] M-ICP 식각 장치에서의 facet evolution II.....	170
[그림 5.6.18] M-ICP 식각 장치에서의 facet evolution III .....	171
[그림 5.6.19] M-ICP 식각 장치에서의 facet evolution IV .....	172
[그림 5.6.20] M-ICP와 ICP에서 식각 할 경우 facet 의 각도 변화 .....	173
[그림 5.6.21] RF bias power 변화에 따른 etch rate 비교 .....	174
[그림 5.6.22] RF bias power 변화에 따른 M-ICP 에서의 IEDA.....	175
[그림 5.6.23] RF bias power 변화에 따른 ion flux 비교 결과 .....	175
[그림 5.6.24] 챔버 종류에 따른 sputtered atoms 의 분포.....	176
[그림 5.6.25] 챔버 종류에 따른 다양한 물질들의 etch rate 비교.....	179
[그림 5.6.26] 패턴 아래쪽에 redeposition 된 모습.....	180
[그림 5.6.27] 이온 에너지 전압과 ion current density 와의 관계.....	183
[그림 5.6.28] 이온 에너지의 변화에 따른 CoFeB 샘플의 식각 후 모습 .....	185
[그림 5.6.29] 이온 에너지 변화에 따른 SiO <sub>2</sub> 와 CoFeB 의 etch rate.....	186
[그림 5.6.30] 이온 에너지 변화에 따른 W 와 TiN 의 etch rate.....	187
[그림 5.6.31] Tilt 각도에 따른 CoFeB 의 식각 후의 SEM images.....	189
[그림 5.6.32] 기판이 50 도 기울어진 경우 식각 모형 .....	190
[그림 5.6.33] 기판 tilt 각도변화에 따른 다양한 물질들의 etch rate.....	191

# 제 1 장 서 론

## 1.1 연구 배경 및 목적

플라즈마(Plasma)란 중성입자와 전하를 띤 입자들의 준중성 (Quasi-neutral) 기체를 말하며[1] 1928년 고전류 진공관을 개발하는 연구를 진행하다가 랑뮤어 (Langmuir) 에 의해 처음으로 플라즈마라는 명칭이 붙여졌다[2]. 플라즈마는 준중성의 성질을 가지지만 전하를 띤 입자들이 존재하고 양전하와 음전하의 국부적인 밀도에 영향을 미치게 된다. 이러한 전하밀도는 원거리 쿨롱 전기력 (Coulomb force) 을 만들어 멀리 떨어져 있는 입자의 운동에도 영향을 주게 되며 집단적인 행동 (Collective behavior) 을 한다. 플라즈마가 처음 발견되었을 때는 주로 자연계에 있는 플라즈마에 대한 연구가 진행되었지만 산업과 과학 기술이 발달함에 따라 보다 더 넓은 범위에서 플라즈마를 응용하려는 연구가 지속적으로 진행되어 왔다. 자체발광 특징을 이용한 디스플레이 소자[3][4], 거대한 에너지를 이용한 핵융합로[5][6], 로켓의 엔진에 응용되는 플라즈마엔진 [7][8], 신물질의 합성[9], 초고밀도 반도체 소자의 제작[10][11], 고 부가가치의 박막 증착[12][13], 의학분야에의 활용[14] 에 이르기 까지 매우 광범위하게 산업적으로 연구가 진행되어왔고 실생활에도 널리 응용되고 있다. 특히, 정보화 시대에서 보다 더 많은 데이터를 고속으로 처리할 필요성이 대두되어 왔고 반도체소자의 스케일은 점점 작아져서 nano device의 시대가 도래하였다. 이를 가능하게 만든 것이 플라즈마를 이용한 건식 식각 기술이라고 할 수 있다. 본 논문은 반도체 소자 제작에 응용되는 플라즈마에 대해 고찰하고자 한다.

플라즈마는 그림 1.1과 같이 플라즈마 온도와 밀도에 따라 다양하게 분류될 수 있다[15]. 산업에 응용되는 분야에 따라 사용되는 플라즈마 종류도 매우 다양하다. 이 중에서도 반도체 소자 제작의 공정단계중 하나인 건식 식각에 사용되는 영역은 글로우 방전 (Glow discharge) 영역이다. 글로우 방전은 동작

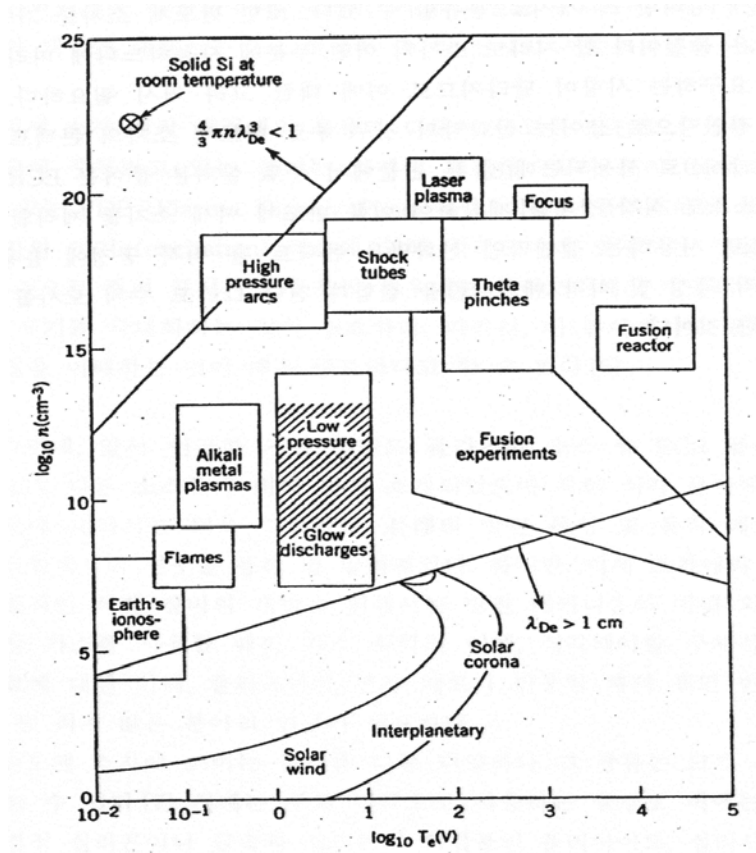


그림 1.1.1 플라즈마의 분류[15]

압력이 낮아서 전자와 이온간의 충돌주파수가 낮게되어 전자온도는 매우 높게 된다. 반면에 중성입자와 이온의 온도는 전자에 비해 상대적으로 낮게되어 열적 평형이 국부적으로 이루어지지 않는다. 전자온도는 약  $10^4 \sim 10^5$  (1eV~10eV) 이지만 기체온도는 실내 온도 정도로 낮아 이를 저온 플라즈마라고 부르고 이는 기체나 용기 벽으로 전달되는 열량이 작아 주위보다 많이 뜨겁지 않기 때문에 생긴 말이라고 할 수 있다. 글로우 방전에서 생성된 플라즈마를 이용하여 미세 패턴에 필수불가결한 비등방성 식각 (anisotropic etching) 이 가능하게 된다. 이는 플라즈마 내에 있는 이온들이 기판의 표면에 형성된 쉬스 (sheath) 의 전기장에 가속되어 소자 제작에 필요한 패턴 식각이 가능하기 때문이다



[16]. 또한 직접적으로 sheath 에서 이온을 가속시켜 기판에 입사시키는 것과 다르게 금속 그리드 (metal grid) 를 통하여 플라즈마 내에 있는 이온들만 추출하여 건식 식각에 사용되기도 한다[17].

전자산업이 발달함에 따라 많은 양의 정보를 보다 더 빠르게 처리하는 것을 필요로 하게 되었고 이로 인해 많은 양의 정보를 담을 수 있는 메모리의 중요성은 끊임없이 대두되어 왔다. 지금까지 주로 사용된 메모리들은 DRAM, SRAM, NAND Flash 등이 있지만 이들 각각의 메모리들은 각기 장단점이 존재하기에 각각 응용범위와 성능이 한정되어 있다고 볼 수 있다. 이러한 메모리들의 단점을 보완하고자 하는 새로운 메모리에 대한 연구가 지속적으로 진행되어 왔다[18,19]. 특히, 개발되고 있는 차세대 메모리 소자로서 유력한 후보군 중 하나가 STT-MRAM이라고 할 수 있다. STT-MRAM 은 자기장의 방향을 바꿔 소자의 저항값을 조절함으로써 디지털 신호인 ‘0’과 ‘1’을 구분하는 구조로 되어 있다[20-22]. STT-MRAM 내에서 이와 같은 핵심역할을 하는 것은 MTJ (magnetic tunneling junction) layer 이다. MTJ layer 는 dielectric layer (MgO) 를 사이에 두고 여러 metal layer (W, Ru, Ta, CoFe, CoFeB, FePt, PtMn, TiN 등) 가 쌓여있는 구조이다. 이와 같은 금속 물질들을 Reactive ion etching (RIE) 로 식각을 하게 되면 non-volatile 한 특성 때문에 식각 후에 생기는 byproducts 들이 완전히 날라가지 않고 MTJ layer 측벽에 붙게 된다. 이런 현상은 MTJ layer 에 있는 dielectric layer의 역할을 무의미하게 만들어 소자내의 electric short 현상을 일으키며 device 가 동작함에 있어 큰 어려움을 유발시킨다[23]. 이러한 non-volatile 한 특성을 가진 물질들을 식각하기 위해서는 physical 한 sputter etching 되어야 한다. 이와 더불어, 측벽에 붙은 물질들을 제거하기 위해 기판을 기울여 측벽 식각도 동시에 이뤄져야 한다. 이런 이유로 인해, Physical 한 sputter etching 과 기판 tilt 기능이 있는 이온 빔 식각 장치가 MTJ 식각에 널리 사용이 되고 있다. 그러나, 일반 적인 이온 빔 식각 장치의 poor 한 etch rate performance 와 높은 에너지를 가지는 이온들을 이용하여 식각할 때 발생하는 ion damage 로 인

해 정상적인 소자 동작에 큰 장애물로 작용하고 있다[24]. 이와 같은 큰 issue 들이 존재하기에 아직까지도 양산화에 큰 어려움을 겪고 있다.

이와 관련하여, 본 논문은 MTJ layer 식각 공정의 어려움을 해결하고자 하는 연구가 진행되어 왔고 기존의 플라즈마 건식 식각 장치 (RIE etcher) 가 아닌 새로운 타입의 이온 빔 식각 장치를 연구하는 것에 초점을 맞추었다. 고밀도 플라즈마를 형성할 수 있다고 연구되어 발표된 바 있는 자화 유도 결합 플라즈마 소스 (Magnetized Inductively Coupled Plasma) [25-27] 를 이용하여 이온 빔 식각 장치를 설계하였다. 이 후 다양한 측정 장비를 통하여 플라즈마의 방전 특성을 분석하였고 이를 이온 빔 특성과 연관시켜 고찰해 보았다. 또한 이온 빔 식각 장치의 균일도 특성을 개선시키고자 하는 연구도 진행되었으며 이에 더하여 MTJ layer를 구성하는 각각의 물질들을 식각함으로써 기존의 M-ICP 플라즈마 식각 장치와 이온빔 식각 장치의 특성을 비교분석하고 고찰해 보았다. 궁극적으로, 새로운 이온 빔 식각 장치의 설계와 이에 관련된 플라즈마 방전 특성, 균일도 특성, MTJ layer 물질들의 식각특성에 대한 종합적인 고찰을 통하여 차세대 뉴 메모리 식각에 활용 할 수 있는 가능성을 검토해 보았다

## 1.2 논문의 구성

본 논문은 제 1 장의 서론과 제 6 장의 결론을 포함하여 모두 6 장으로 구성되어 있으며 이에 더하여 부록을 수록하였다. 제 2 장에서는 기존에 연구된 플라즈마 식각 장치의 원리 및 특징에 대하여 소개하였다. 저밀도 플라즈마 식각 장치 뿐만 아니라 고밀도 플라즈마 식각 장치도 살펴보았고 본 논문의 핵심 중 하나인 M-ICP 에 대하여 자세히 설명하였다. 이와 더불어 다양한 플라즈마 소스를 이용한 이온 빔 식각 장치들의 원리 및 특징에 대해 소개하였으며 이온 빔 식각 장치를 이용한 선행 연구 및 최근 동향에 대해 살펴보았다.

제 3 장에서는 M-ICP 소스를 이용한 이온 빔 식각 장치 설계 및 방전 특성에 대하여 설명 하였다. 새로운 전자석 위치를 설계하기 위해 무료로 배포되는 소프트웨어인 FEMM(ver. 4.2)을 활용하여 실제 이온 빔 식각 장치의 dimension을 기반으로 한 모델링을 완료한 후 이온 빔 식각 장치의 메탈 그리드 중심에서 원하는 자기장 세기를 얻을 수 있도록 전자석의 반경 및 코일의 turn 수 등을 설계하였다. 자기장 최적화에 따른 선행연구를 살펴봄과 동시에 이를 응용하여 전류 세기에 따른 공간 분포 변화를 살펴보고 Gaussmeter 로 실제 자기장을 측정하여 시뮬레이션 결과와 일치함을 확인하였다. 특히 자기장 세기를 조절함으로써 이로 인해 나타나는 플라즈마 소스에서의 방전특성을 Dual Langmuir Probe (DLP) 를 통하여 확인하였고, Ion Energy Analyzer (IEA) 를 이용하여 ion flux를 측정함으로써 자기장의 세기와 이온 빔 세기의 상관관계를 살펴보았다. 또한 RF Source power의 가변에 따른 방전 및 ion flux의 특성도 살펴보았고 그리드 구멍 지름을 다르게 제작하여 이온 빔 특성을 살펴봄으로써 플라즈마와 그리드 구멍에서 형성되는 쉬스에 대한 이론을 고찰하였다.

제 4 장에서는 M-ICP 이온 빔 식각 장치의 균일도 특성에 대하여 살펴보았다. M-ICP 플라즈마 식각 장치에서의 균일도 특성은 연구된바 있지만 새롭게 디자인된 이온 빔 식각 장치에서는 균일도 특성이 보고된 바 없다. 또한 양산

을 위한 대면적 공정으로 가기 위해서는 균일도 우수성은 매우 중요한 요소이기도 하다. 그렇기 때문에 M-ICP 플라즈마 소스 기반인 이온 빔 식각 장치에서의 균일도 특성에 대해 자세히 분석해 보았다. 인가된 전류의 크기 및 방향을 조절함으로써 다른 자기장 구배를 디자인 할 수 있었고 이에 따른 플라즈마 방전 특성 및 ion flux의 uniformity 특성을 분석해보았다. 또한 이를 실제 식각을 진행하여 이온 빔 균일도와 식각 균일도간의 상관관계에 대하여 규명해 보았다. 자기장 기울기를 변화시키는 것뿐만 아니라 그리드 구멍 밀도를 반경방향에 따라 다르게 가져감으로써 이로 인해 나타나는 ion flux 균일도 특성을 살펴보고 더불어 식각 균일도 특성도 살펴보았다.

제 5 장에서는 MTJ layer 구성 물질들의 식각 특성에 대하여 고찰하였다. 차세대 메모리로서 연구가 진행중인 STT-MRAM의 구조적인 소개와 함께 세계 각지의 다른 그룹에서의 MTJ layer 의 식각 선행 연구를 살펴보았다. 또한 MTJ layer에 들어있는 다양한 물질들의 sputter yield를 SRIM (The Stopping and Range of Ions in Matter) 시뮬레이션을 통하여 살펴보았다. 이와 더불어 기존에 연구된 바 있는 M-ICP 플라즈마 식각 장치에서의 식각 특성을 본 논문에서 새로 디자인 한 M-ICP 이온 빔 식각 장치와의 특성을 비교 분석하고 고찰하였다.

제 6 장에서는 본 논문에서 다룬 내용들을 총 정리하는 동시에 새롭게 디자인한 M-ICP 이온 빔 식각 장치에서의 연구결과들이 학술적인 측면에서는 어떤 의미를 가지고 산업적인 측면에서는 어떠한 기여를 할 수 있는지 고찰하도록 하겠다.

## 제 2 장 플라즈마 식각 장치 및 이온 빔 식각 장치

### 2.1 반도체 분야의 플라즈마 식각 응용

반도체를 제작 하는 여러 공정들 중에서 패터닝 (patterning) 할 때 중요한 공정 중 하나가 식각 공정 (etch process) 이다. 이는 소자집적도가 커지고 스케일이 작아짐 (scaling down) 에 따라 보다 더 강조되고 있다. 식각은 크게 습식 식각 (wet etching 혹은 wet chemical etching) 과 건식 식각 (dry etching) 으로 나눌 수 있다. 습식 식각은 반응성 용액을 사용하여 물질을 선택적으로 제거할 때 사용되어지며 수직방향으로의 식각 속도와 수평방향으로의 식각 속도가 같은 등방성 식각 (isotropic etch) 이 얻어지게 된다. 건식 식각은 수용액을 사용하는 습식 식각과는 달리 반응성 기체 혹은 증기를 이용하거나 플라즈마를 이용하여 식각을 하게 된다.

반응성기체나 증기를 이용할때는 습식 식각과 마찬가지로 등방성 식각의 결과가 얻어지지만 플라즈마를 이용할 경우에는 수직방향으로의 식각속도와 수

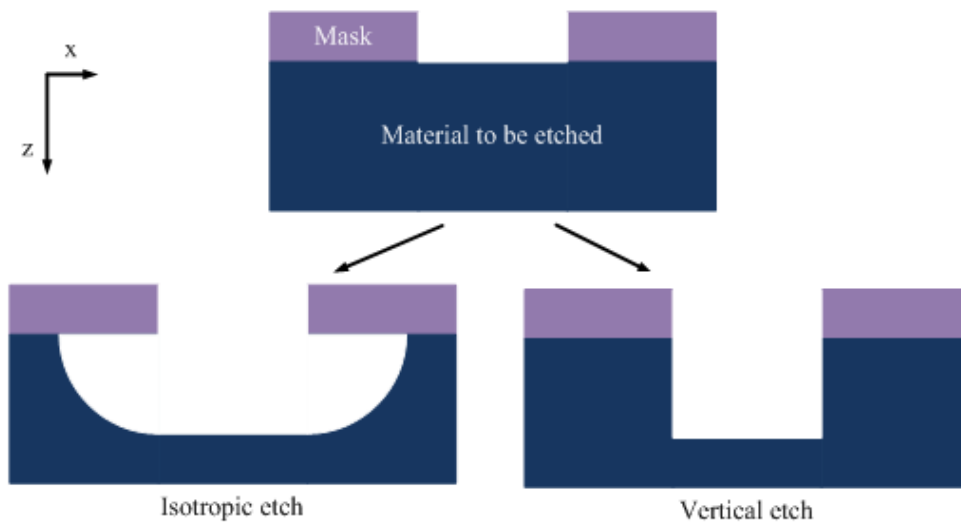


그림 2.1.1 습식 식각과 건식 식각의 방향성[28]

평방향으로의 식각 속도가 다른 이방성 식각 (anisotropic) 이 얻어지게 된다. 습식 식각과 건식 식각의 차이는 그림 2.1 의 형태로 나타나게 된다[28].

플라즈마를 이용한 식각은 이온 및 가스에서 분해된 라디칼 (radical) 을 이용하여 식각하게 되며 장점으로는 습식 식각과는 다르게 마스크 (mask) 패턴을 식각하고자 하는 물질에 정확히 이전할 수 있는 높은 방향성 식각 (highly directional etching) 이 가능하고 일반적으로 비용이 저렴하다. 또한 용액을 사용하는 습식 식각에 비하여 환경 오염가능성도 적다. 대표적인 단점으로는 플라즈마 내 이온에 의한 식각 물질의 데미지 (damage) 가 있다. 그러나 이러한 단점이 있음에도 불구하고 플라즈마를 사용하는 것은 반도체 공정에서 미세패턴 식각을 함에 있어서 필수불가결한 요소로 자리잡고 있기 때문이다. 플라즈마를 이용하여 높은 이방성 특징을 얻을 수 있어야 나노급 (nano scale)의 소자제작이 가능하기 때문에 지금까지 반도체 분야의 발전에 큰 이바지를 하였고 필수불가결한 요소로 플라즈마 식각공정은 자리매김해 왔다.

## 2.2 다양한 플라즈마 소스를 이용한 플라즈마 식각 장치

### 2.2.1 플라즈마 식각 장치의 종류

플라즈마를 이용한 건식 식각 공정은 wafer 위에 형성된 mask 패턴에 따라 밑에 하부 막질을 제거하여 미세 pattern 을 구현하는 공정으로써 반도체소자를 제작하는 전체 공정중에서 매우 중요하다고 할 수 있다. 플라즈마를 생성시키는 방법에 따라 용량 결합 플라즈마 (Capacitively Coupled Plasma) 혹은 RIE (Reactive Ion Etch) reactor, MERIE (Magnetic Enhanced RIE), ECR (Electron Cyclotron Resonance) plasma, Helicon plasma, 유도 결합 플라즈마 (Inductively Coupled Plasma), 자화 유도 결합 플라즈마 (Magnetized Inductively Coupled Plasma) 등 다양한 플라즈마 식각장치들이 개발되고 제안되어 실제로 반도체 산업에 적용되고 있다. 그림 2.2.1 다양한 플라즈마 식각 장치의 공정압력과 플라즈마 밀도에 따라 분류한 것이다[29].

초기의 플라즈마 식각 장치인 RF plasma etcher 는 wafer 가 놓이는 전극을 ground 로 유지하고 상부 전극에 RF 를 인가하는 방식이다. 이는 self-DC bias 가

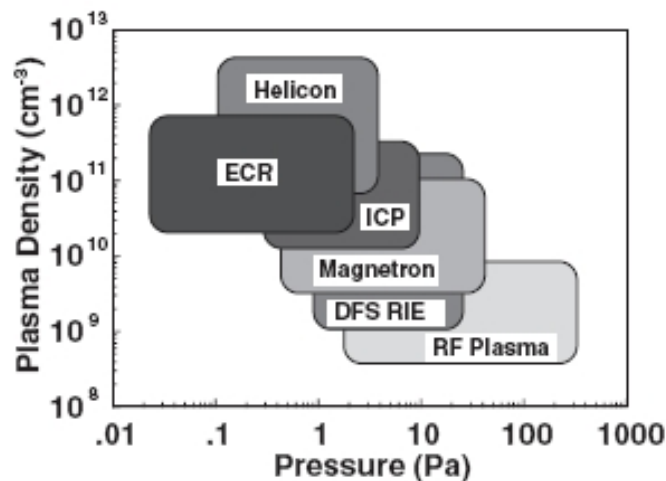


그림 2.2.1 공정 압력과 플라즈마 밀도에 따른 플라즈마 식각 장치의 분류[29]

약하기 때문에 wafer 로 입사하는 ion 들의 에너지가 매우 작아 etch rate 이 현저히 낮다. Ion energy 에 의한 식각이 아닌 radical 에 의한 chemical 식각이 주된 방법으로써 미세 pattern 형성에는 적합하지 않아 현재는 거의 사용하지 않고 있다[30]. 이후에는 wafer 가 놓이는 기판에 RF 를 인가하는 방식으로 RIE type[31] 의 etcher 가 널리 사용되었다.

RIE type etcher 의 구조 [32] 는 그림 2.2.2 와 같고 기판에 RF 를 인가함으로써 ion 의 self-DC bias 를 높게 가져갈수 있어 physical 한 식각이 가능하게 된다. 이로인해 높은 etch rate 을 확보 할수 있을 뿐만 아니라 미세 pattern 가공에도 유리하다.

RIE etcher 는 높은 ion energy 를 이용함으로써 etch rate 을 얻을 수 있었지만 플라즈마 밀도가 낮은 특성이 있다. 이를 보완하고자 RIE etcher 에 자기장을 인가한 것이 그림 2.2.3 과 같은 구조인 MERIE type etcher[33][34] 이다. MERIE etcher 는 자기장으로 인하여 고밀도 플라즈마를 형성함과 동시에 물질의 etch

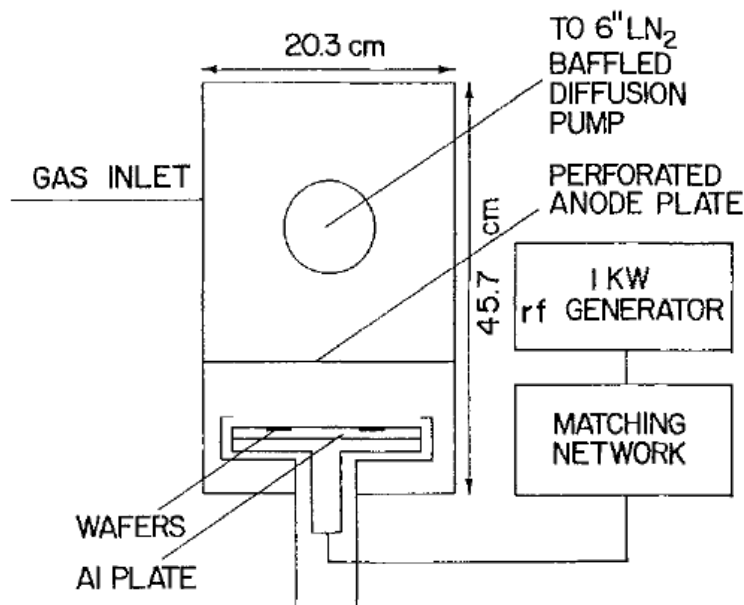


그림 2.2.2 RIE etcher 의 구조[32]



rate 을 더욱 증가시킬 수 있다. 또한 저압에서 안정적인 plasma 방전이 가능하기 때문에 정밀한 미세 pattern 의 etch 가 가능하며 polymer 증착을 통한 PR 대비 선택비에도 유리한 장점이 있다. 그러나 측면의 전류가 흐르는 코일로 인해  $\vec{E}$  에 수직한 방향으로 자장이 발생하게 되고 이로 인해 전자는  $\vec{E} \times \vec{B}$  drift 를 하게 된다. 결과적으로 전자가 chamber wall 로 손실되는 것은 방지할 수 있지만 plasma uniformity 가 떨어져서[34] 대면적 공정에 어려움이 있다.

ECR plasma etcher 는 그림 2.2.4 와 같이 microwave 에 자기장을 인가하여 낮은 압력에서도 chamber 표면으로부터 떨어진 곳에 고밀도의 플라즈마를 생성할 수 있다[28][35]. 고밀도 플라즈마 식각 장치중 가장 높은 플라즈마 밀도를 형성할 수 있는 장치이다. 자장이 있으면 전자는 특정주기로 자기장 주위를 회전하게 되고 이 때 인가하는 microwave 의 주파수가 전자의 회전하게 되는 주파수와 일치할 때 ECR 조건을 만족하게 되며 전력 전달 효율이 극대화된다.

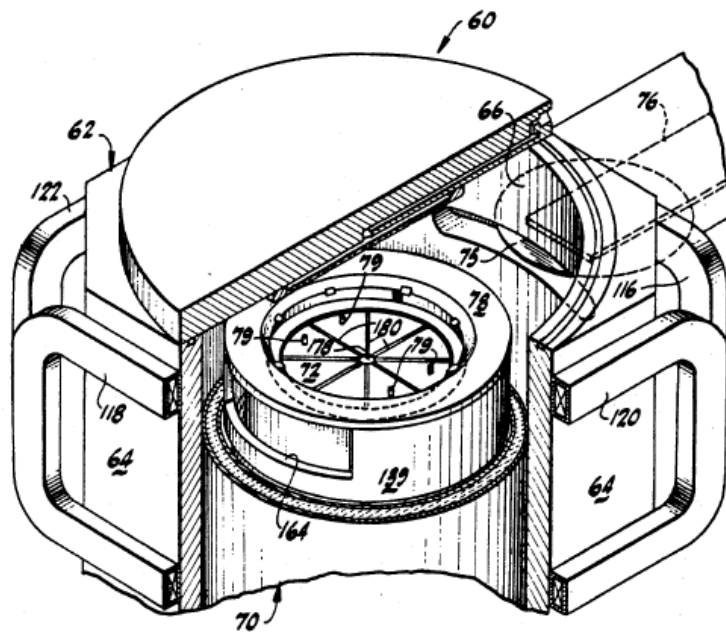


그림 2.2.3 MERIE etcher 의 구조[34]

Microwave 의 주파수가 2.45GHz 일 경우에는 ECR 조건을 만족하는 자기장 세기는 875 Gauss 이다. 그러나 이처럼 높은 자기장을 전자석을 이용하여 대면적에서 얻기는 어렵고 균일하게 얻기는 더욱 더 어렵게 된다. 또한 넓은 면적에서 높은 자기장을 균일하게 얻기 위해서는 식각 장치가 매우 커져야 하는 단점이 있다. 이로 인해 ECR plasma etcher 는 대면적 공정에 어려움이 있다.

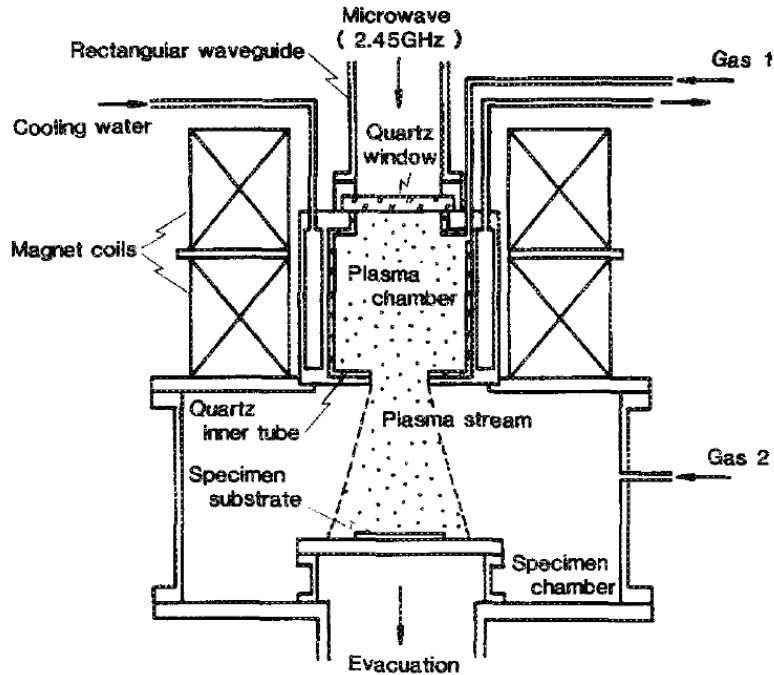


그림 2.2.4 ECR etcher 의 구조[35]

Helicon plasma etcher 는 플라즈마 내부에 생성된 helicon wave 의 특성을 이용한 플라즈마 식각 장치이다. Helicon wave 는 플라즈마 wave 중 하나인 whistler wave 가 자화된 일정 크기의 용기내에 구속 전파되는 것으로써 wave 가 나선형을 따라 전파가 되므로 helicon 이라고 붙여지게 되었다. 그림 2.2.5 와 같이 source RF power 는 수 ~ 수십 MHz 단위를 사용하며 플라즈마가 생성되는 chamber 주변에 ECR plasma etcher 보다는 약한 자기장을 이용하여 고밀도

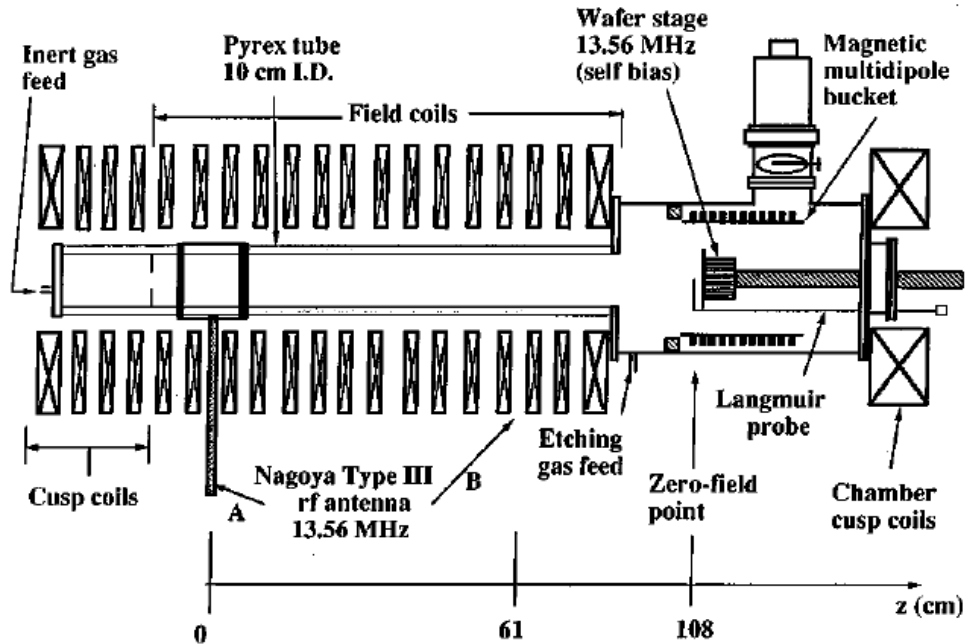


그림 2.2.5 Helicon plasma etcher 의 구조[36]

플라즈마를 생산한다[28][36]. 그러나 helicon plasma etcher 역시 확산챔버가 필요하며 대면적화가 어렵다는 단점이 있다.

유도 결합 플라즈마 (Inductively Coupled Plasma) etcher [37] 는 그림 2.2.6 과 같이 process chamber 상부에 원형 또는 나선형의 antenna coil 에 수 ~ 수십 MHz 의 RF power 를 인가하여 플라즈마를 생성하는 식각 장치이다. Coil 에 전류를 흘려 자기장을 만들며 이 자기장은 다시 process chamber 내에 전기장을 유도시키며 이는 전자를 가속시켜 플라즈마를 발생시킨다. ECR etcher 나 Helicon plasma etcher 에 비해 구조가 간단하고 매우 낮은 압력에서도 플라즈마를 발생시킬 수 있기 때문에 미세패턴 가공에 유리하다는 장점이 있다. 플라즈마를 발생하는 RF source 와 식각에 필요한 ion 을 독립적으로 컨트롤 할 수 있는 장점도 가지고 있어 현재까지도 poly 나 Al metal 식각에 널리 사용되고 있다.

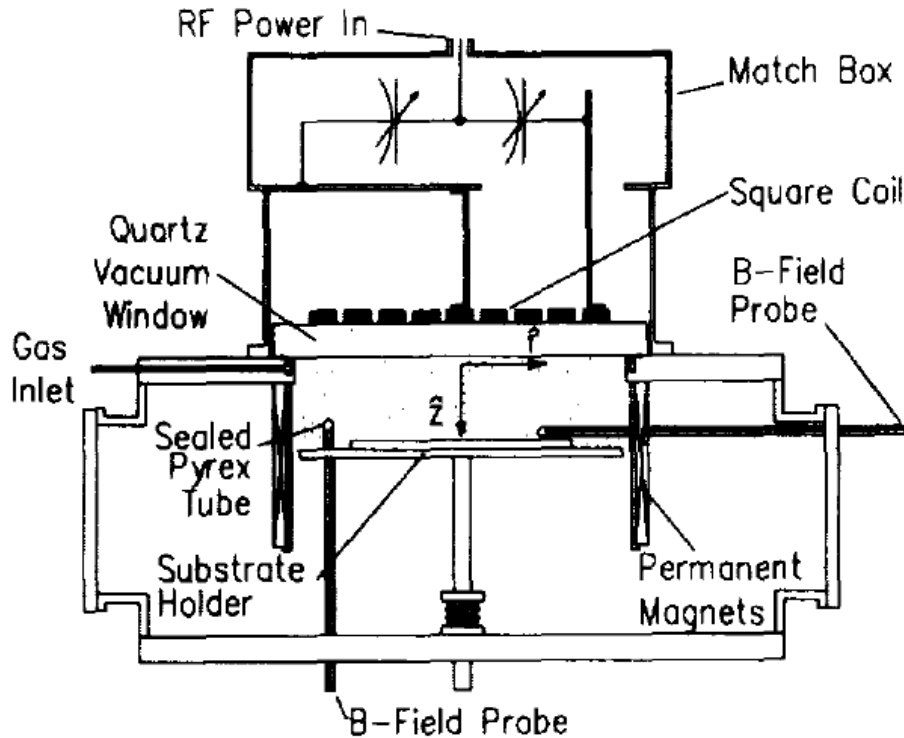


그림 2.2.6 Inductively coupled plasma etcher 의 구조[37]

자화 유도 결합 플라즈마 (Magnetized Inductively Coupled Plasma)[38] 는 그림 2.2.7 과 같이 ICP etcher 의 구조에 주변에 자기장을 인가한 형태로 RF power 는 수 ~ 수십 MHz 를 사용하며 자기장은 ECR 과 Helicon plasma 와 달리 매우 약한 자기장 (수 ~ 수십 Gauss) 을 이용한다. ICP 에서 보여왔던 플라즈마 발생메카니즘에 추가적으로 wave heating 에 의한 효과를 기대할 수 있어 ICP 대비해서 보다 더 큰 플라즈마 밀도를 얻을 수 있으며[25] 자기장 기울기에 따라 균일도 특성을 변화[38] 시킬 수 있어 대면적 공정에도 유리한 장점이 있다. 이와 관련해서는 4.1 절에서 자세히 서술하도록 하겠다.

과거와 현재에 반도체 etch process 에 활발히 사용이 되거나 지속적으로 연구가 되고있는 플라즈마 etch 장치에 대하여 다양하게 살펴보았다. 각각의 식각장치가 서로 장단점이 있지만 효율적으로 etch process 를 진행하기 위해서

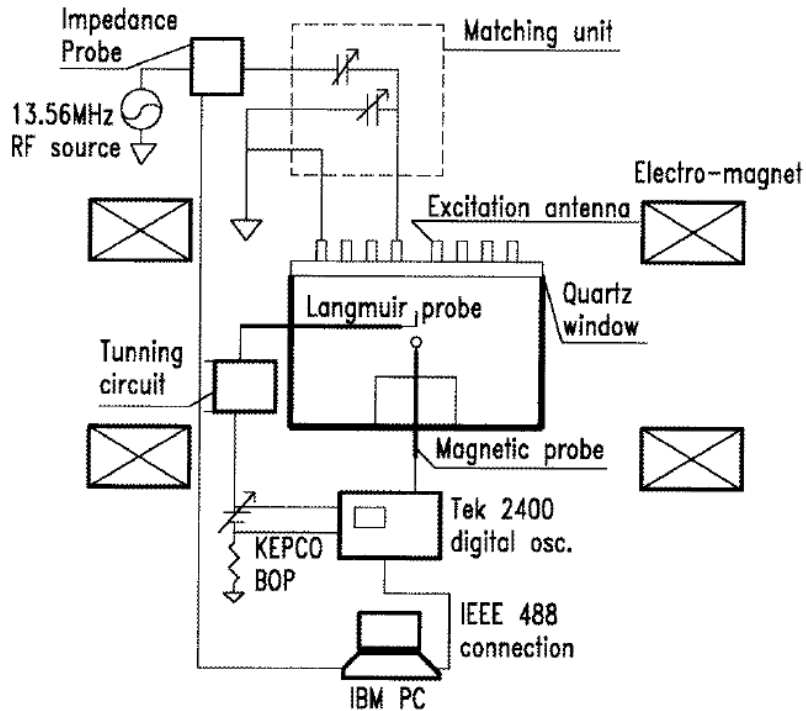


그림 2.2.7 Magnetized inductively coupled plasma etcher 의 구조[25]

는 etch rate 이 빠름은 물론이거니와 대면적 공정에도 유리해야 산업에서 큰 효율을 발휘할 수 있음을 알 수 있다. 자기장을 플라즈마 식각 장치에 이용하면 높은 plasma density 를 얻음으로써 제품의 생산성은 높일 수 있지만 대면적 공정에 어려움이 있지만 본 연구실에서 진행된 선행 연구를 통해 ICP 에 약자장을 인가하여 자화 유도 결합 플라즈마 (M-ICP) 를 이용하면 균일도 측면도 유리하게 가져 갈 수 있다고 보고된 바 있다[38].

플라즈마 식각 장치의 대표적이라고 할 수 있는 용량 결합 플라즈마 (Capacitively Coupled Plasma)와 유도 결합 플라즈마 (Inductively Coupled Plasma) 두가지 식각 장치의 원리에 대해 다음 2.2.2절과 2.2.3절에서 자세히 살펴 보고자 한다. 이와 더불어 본 연구실에서 활발히 진행이 되어왔던 자화 유도 결합 플라즈마 (Magnetized Inductively Coupled Plasma)의 원리에 대해서도 2.2.4절에서 자세히 살펴보고자 한다.

## 2.2.2 용량 결합 플라즈마 (CCP) 장치의 원리

앞 절에서 다양한 플라즈마 식각 장치에 대하여 살펴 보았다. 그 중에서 먼저 용량 결합 플라즈마 (CCP) 식각 장치의 원리에 대하여 살펴보고자 한다 [28]. 용량 결합 플라즈마 (CCP) 식각 장치에서는 주로 이온에 의한 물리적 식각이 지배적으로 이뤄지고 있기 때문에 이에 대한 이해가 필요하다. 그림 2.2.8은 CCP type 식각 장치의 개념도 이다. 그림에서 볼 수 있듯이 매우 간단한 구조로 되어 있고 DC 전원을 인가하는 경우에는, 식각하는 물질이 절연체 이거나 전극이 절연체일 경우에는 전하가 축적되어 식각이 되지 않기 때문에 wafer가 놓이는 전극은 AC 전원이 인가된다.

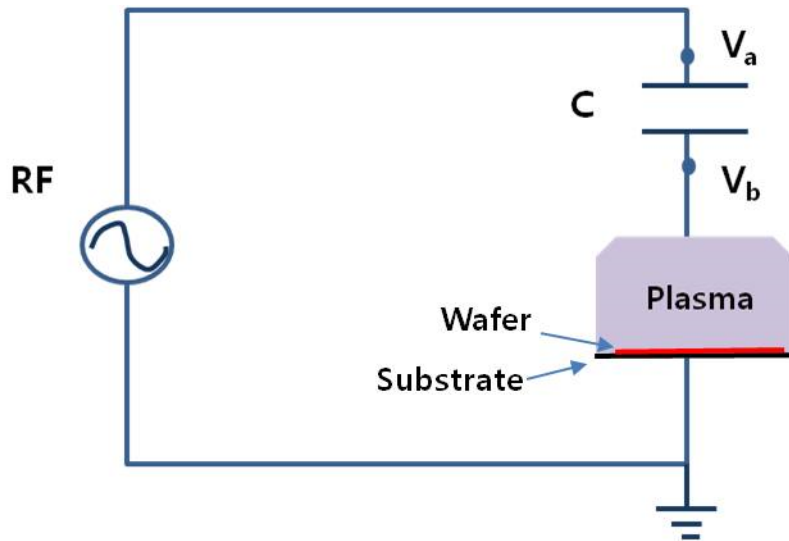


그림 2.2.8 CCP etcher 의 개념도[28][39]

교류전원의 주파수는 100KHz ~ 100MHz 이상까지 다양한 범위의 주파수를 사용하고 있는데 주로 사용하는 주파수는 13.56MHz이다. 그림을 보면 플라즈마가 축전기와 직렬로 연결되어 있는 형태이며 이 축전기는 Blocking Capacitor라고 부른다. 이 축전기로 인하여 전극에 RF 전력을 가하게 되면 바이어스 전압이 유도되는데 이를 직류 자기유도 전압 (DC Self-bias voltage) 라고 부르며

전극에 음의 전압이 유도가 되어 플라즈마 내의 이온을 기관쪽으로 끌어당겨 물리적 식각이 가능하게 된다. 축전기와 플라즈마가 직렬로 연결된 경우에는 직류전류는 흐르지 못하고 교류 전류만 흐르게 되는데 이는 AC 교류 전원을 인가하게 되면 전극에서는 이온 전류의 양과 전자 전류의 양은 같게 됨을 의미한다. 일정한 전기장의 형성되었을 때 전하에 가해지는 힘  $F$ 는 식 2.2.1 과 같고 어떤면으로 입사하는 전하의 flux  $J$  는 식 2.2.2 와 같다.

$$F = m\vec{a} = e\vec{E} \rightarrow \vec{a} = \frac{e\vec{E}}{m} \rightarrow \vec{v} = \frac{e\vec{E}}{m}\tau, (\tau \text{는 가속 시간}) \quad (2.2.1)$$

$$J = ne\vec{v} = ne\left(\frac{e\vec{E}}{m}\right) = \frac{ne^2\tau}{m}\vec{E} \quad (2.2.2)$$

식 2.2.1에 따르면 가속도는 질량에 반비례 하게 되고 식 2.2.2에 따르면  $J$  역시 질량에 반비례하게 된다. 이온의 질량이 전자보다 매우 크기 때문에 ( $M_i \gg M_e$ ) 반비례 관계인  $J$  를 생각해보면 전자의 전류밀도 ( $J_e$ ) 가 이온의 전류밀도 ( $J_i$ ) 보다 매우 크다는 것을 쉽게 이해할 수 있다. ( $J_e \gg J_i$ )

한편, capacitor 가 연결된 전극에  $+V_a$ 를 가하면 전자가 수집되고  $-V_a$  를 가하면 이온이 수집된다. 일정한 전기장 하에서  $J_e \gg J_i$  이므로 AC 교류전원의 한 주기당 전자가 이온보다 더 많이 수집되게 되며 이는 시간이 지남에 따라 전극이 음 (negative) 으로 charging이 된다. 주기를 거듭함으로써 전자가 많아져서 음의 전압값은 지속적으로 떨어지다가  $J_e = J_i$  을 만족하게 되면 더 이상 떨어지지 않고 일정한 전압의 steady state를 유지하게 된다. 이때의 전압 값이 직류 자기 유도 전압이다. 통상적인 RF 교류 전원의 sine 파형을 생각해 보자. 그림 2.2.9에서 보는것과 같이 sine wave일 경우 플라즈마와 접한 전극은  $V_b$  가 한 주기당 음으로 대전되어 있는 시간이 양으로 대전되어 있는 시간보다 상대적으로 매우 길게 되고 이로인해 대부분의 시간동안 전극은 음의 전압

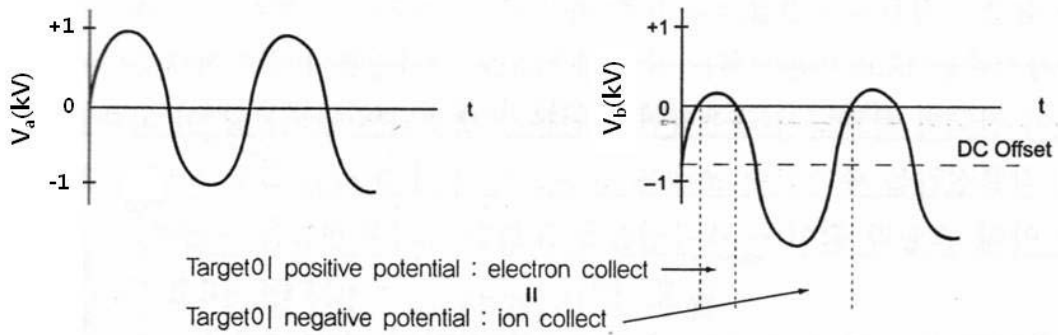


그림 2.2.9 RF 가 sine wave 인 경우  $V_a$ 와  $V_b$  [28][39]

(negative potential) 을 유지하게 된다. 이러한 전극의 전압특성으로 인해 플라즈마 내의 이온을 끌어당겨 ion bombardment로 식각이 가능하게 된다.

위와 같은 원리로 동작하는 기존의 CCP 혹은 RIE type 식각 장치의 경우에는 다른 플라즈마의 식각 장치에 비해 상대적으로 플라즈마 밀도가 낮고 동작 압력이 높아 초미세 pattern을 식각하는데 쓰이기는 어려운 부분이 있다. 또한 단일 전극에만 하나의 RF 를 인가하게 되면 플라즈마 밀도와 이온에너지를 독립적으로 제어하지 못해 식각의 효율성이 떨어질 수 있는 있다. 이를 보완하고자 RF 교류전원의 주파수를 수십 ~ 수백 MHz를 사용 [40]-[42] 하여 연구가 진행되어 왔다. 또한 그림 2.2.10 과 같이 전극 두개에 각각 다른 주파수를 인가[43] 하거나 그림 2.2.11 과 같이 전극 하나에 두개 이상 주파수를 인가[44] 하여 위의 단점을 해결하고자 하는 연구도 지속적으로 진행되어 왔다.



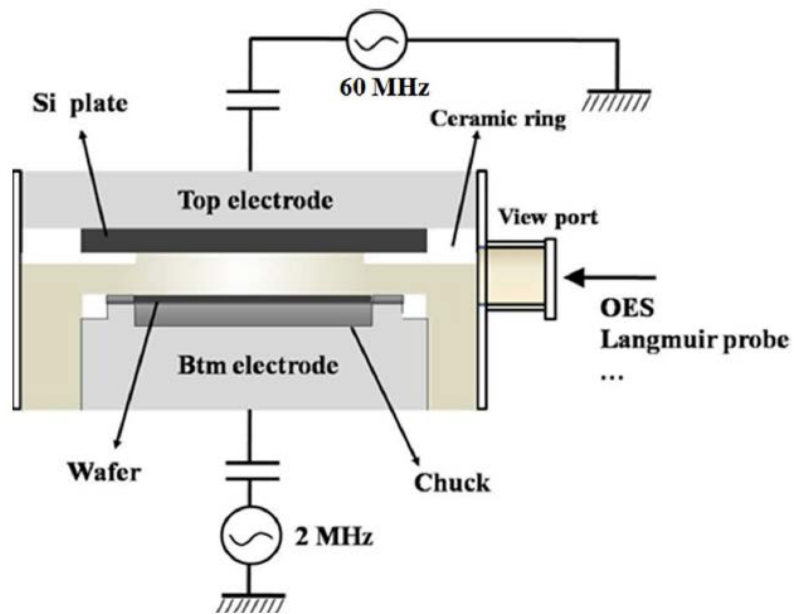


그림 2.2.10 다른 전극에 각각 RF를 인가하는 CCP type[43]

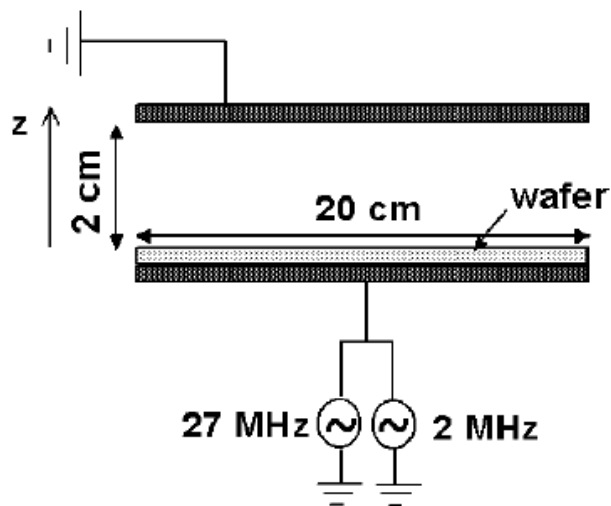


그림 2.2.11 같은 전극에 RF를 두 개 이상 인가하는 CCP type[44]

### 2.2.3 유도 결합 플라즈마 (ICP) 장치의 원리

CCP 타입의 식각 장치와 더불어 대표적인 유도 결합 플라즈마 (ICP) 식각 장치의 원리에 대해 살펴보기에 앞서 다른 type의 ICP 장치에 대해 살펴보도록 한다. 유도 결합 플라즈마 식각 장치는 크게 평판형 type과 실린더형 type 두 가지로 나눌 수 있다. 그림 2.2.12는 평판형 type의 개념도를 나타내고 있으며 [28] RF를 인가하는 antenna가 process chamber 위쪽에 있는 큰 특징이 있다. 통상적으로 antenna는 구리선을 사용하며 가운데서부터 바깥쪽까지 1~4회 정도 원형으로 감겨 있다. antenna로부터 발생된 전자기파가 process chamber 안쪽으로 잘 전파되기 위하여 anodizing 처리가 된 알루미늄, quartz, 세라믹과 같은 절연 물질 (dielectric) 을 antenna와 process chamber 사이에 위치시킨다.

유도 결합 플라즈마 식각 장치의 실린더 type의 개념도는 그림 2.2.13에서 나타내고 있다[28]. 평판형 type과 달리 RF를 인가하는 안테나가 process 챔버

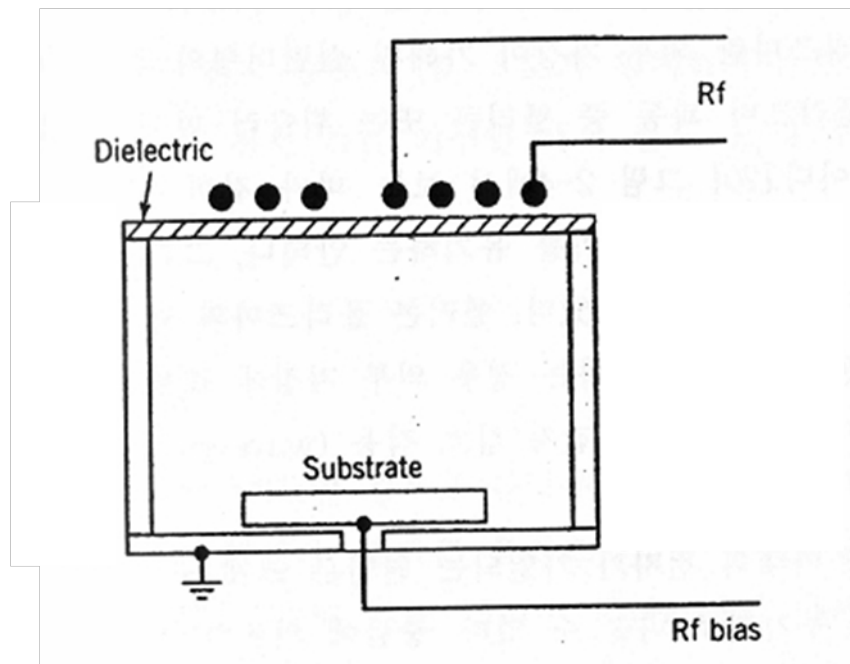


그림 2.2.12 평판형 type 유도 결합 플라즈마 식각 장치의 개념도[28]

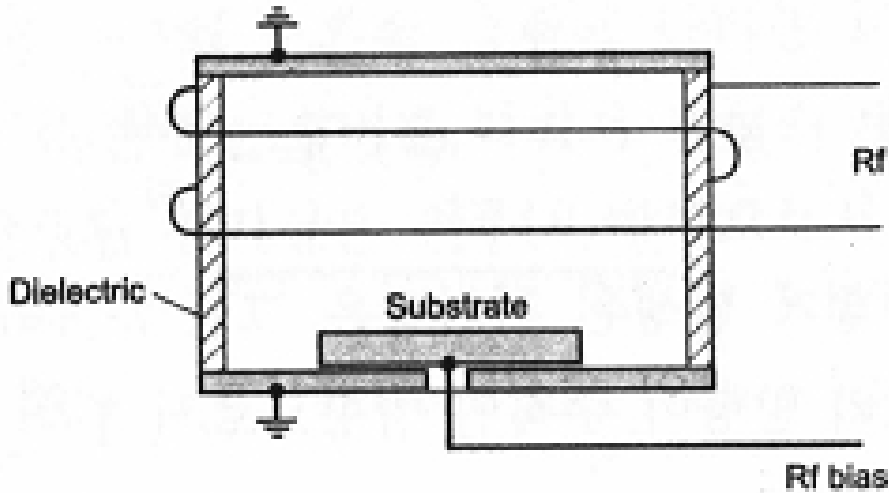


그림 2.2.13 실린더 type 유도 결합 플라즈마 식각 장치의 개념도[28]

벽면에 감겨있다. 실린더 type역시 antenna에서 발생된 전자기파의 침투를 원활히 하기 위해 process chamber 벽면은 절연물질 (dielectric) 으로 되어 있다.

두 개의 type (평판형, 실린더형) 모두 wafer가 놓이는 기판에 별도의 RF전력을 추가로 인가한다. 이는 antenna에 의해 발생된 플라즈마 내의 이온 에너지는 매우 약하기 때문에 이온을 식각에 이용하기 위해서는 더 높은 에너지가 필요하다. 식각에 필요한 높은 이온에너지를 얻기 위해 기판에 RF 전력을 인가하게 되며, 이는 플라즈마와 기판 사이에 생기는 sheath potential로 얻을 수가 있다. 기판에 RF를 인가하게 되면 dc self-bias voltage가 형성되며 이온을 wafer에 수직으로 끌어당기는 역할을 하게 된다. 결국 플라즈마와 기판 사이에 생기는 sheath potential로 식각을 하는 것이다.

구조상의 약간의 차이만 있을 뿐 기본적인 동작 원리는 평판형 type이나 실린더 type이나 크게 다르지 않으며[45] 통상적인 유도 결합 플라즈마의 방전 원리는 다음과 같다[45][46]. 전력전달 수단으로는 전압과 전류가 시간에 따라 변하는 RF 전원 장치를 사용하고 있으며, 장비에 사용하는 주파수의 범위는 통상적으로 법에 의해 규정되어 있다. 외부의 coil (antenna) 을 통해 시변하는

전류를 인가하는 경우에 전류의 주위는 식 2.2.3과 같은 Ampere의 법칙에 의해 시변하는 자계가 형성된다.

$$\nabla \times \vec{B} = \mu_0 \vec{J} \quad (2.2.3)$$

또한 위의 식과 같이 시변 자계가 형성되게 되면 Faraday의 유도 법칙 (Faraday's Induction Law) 에 따라 시변 전계가 식 2.2.4와 같이 유도된다.

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (2.2.4)$$

이렇게 발생한 전기장은 자기장의 방향이 수직인 방향으로서 챔버 주위에 원형으로 발생을 하게 되며 식 2.2.5와 같이 표현이 가능하다.

$$\vec{E}_\theta = -\frac{1}{2} k B_0 e^{kt} r \vec{a}_\theta \quad (2.2.5)$$

이에 따라서 플라즈마 내 전자가 이 전기장의 방향을 따라 가속이 되면서 에너지를 얻게 되어 이온화 및 여기 (excitation) 를 하게 된다. 고밀도 플라즈마를 얻을 수 있는 이유는 가속되는 전자가 chamber 벽 방향이 아니라 챔버 내부를 도는 원형을 갖기 때문에 chamber 벽으로 가속하여 에너지를 소모하지 않고 전자의 에너지를 이온화 및 여기현상에 모두 사용할 수 있기 때문이다.

또한, 식 2.2.4 와 같이 유도된 비발산 회전 전계 (Divergence Free Electric Field) 는 식 2.2.6 와 같이 표현될 수 있다.

$$\vec{J}_p = \sigma_p \vec{E} \quad (2.2.6)$$

이는 간단하게는 변압기에 비유할 수 있는데, 플라스마 전류를 구동하여 전자에 전력을 전달하고 플라스마 내부의 전류 경로는 1회 감겨진 변압기의 2차 축과 같은 역할을 한다. 만약 플라스마 내부의 표피 전류에 의해 induce되는 시변 자기 flux가 외부 코일에 의해 생성되는 자기 flux를 완전 상쇄시킬 경우에는 결합계수(k)가 1이 되어 전원 쪽의 전력이 100% 효율을 보이며 플라스마로 전달되지만 이 경우는 ideal한 경우에 해당하고 실제로는 그렇지 않다. 일반적으로는 전류 경로가 공간적으로 분포되어 있고 플라스마의 전기 전도도 등에 의해 결합계수는 1이 되지 않고 상당한 제약을 받게 된다. 결국 결합 효율은 전자의 분포와 밀도, 충돌 주파수, 방전 압력등의 변수에 결정된다. 유도 결합 플라스마 식각 장치에 자기장을 설치하여 전력 전달 효율을 높일 수 있는데 자화 유도 결합 플라스마 식각 장치의 원리에 대해서는 다음 절 (2.2.4)에서 자세히 살펴보기로 한다.

그림 2.2.14는 유도 결합 플라스마 식각 장치의 전기적 등가회로를 나타내고 있으며 coil과 플라스마 사이의 전력전달 관계는 변압기 모델로 쉽게 설명

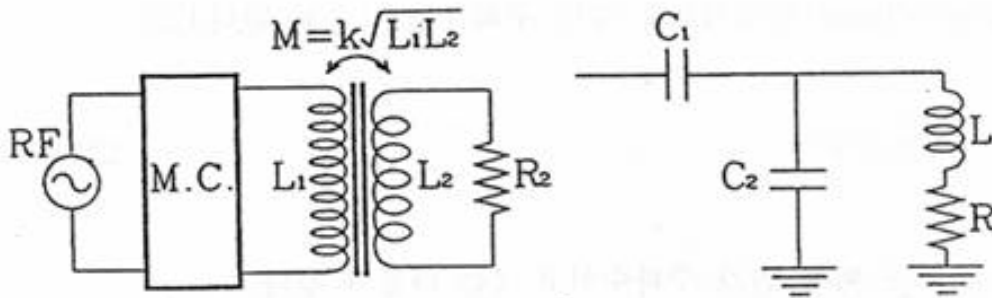


그림 2.2.14 유도 결합 플라스마의 전기적 등가 회로[45]

(M; 상호 인덕턴스, k; 결합계수,  $L_1$ ; 유도 결합용 코일에 의한 인덕턴스,  $L_2$ ; 플라스마에 의한 인덕턴스,  $R_2$ ; sheath 및 플라스마에 의한 저항 값,  $C_1$  &  $C_2$ ; 플라스마 sheath 및 vacuum window에 의한 capacitance)

이 가능하다. RF coil에 의해 발생된 인덕턴스 ( $L_1$ ) 는 변압기의 primary wiring으로 생각할 수 있고 발생하는 플라즈마에 의한 인덕턴스 ( $L_2$ ) 는 변압기의 secondary wiring으로 생각할 수 있다. 또한  $L_2$ 에 의해 전류가 유도되며, 플라즈마 내 저항 ( $R$ ) 에 의해 에너지가 소비된다. 이 때, 소모되는 전력은 중성 원자의 이온화, gas dissociation, 여기화 등으로 사용된다. 또한 plasma sheath와 vacuum window (dielectric) 의 capacitance를 각각  $C_1, C_2$  로 나타낼수 있으며 이 두개의 capacitance에 의해 정전 결합도 발생할 수 있다. 따라서 유도 결합에 의한 플라즈마 뿐만 아니라 정전 결합에 의한 플라즈마도 동시에 발생하게 된다[28].

## 2.2.4 자화 유도 결합 플라즈마 (M-ICP) 장치의 원리

자화 유도 결합 플라즈마 (M-ICP) 식각 장치는 앞의 절에서 원리를 자세히 살펴보았던 유도 결합 플라즈마 (ICP) 식각 장치의 외부에 약한 자기장을 인가하는 구조이며, 자기장은 원형 안테나에서 유도되는 회전 전계와 수직한 방향으로 인가되어 자장에 대하여 평행하게 진행하는 횡파를 쉽게 여기시킬 수 있는 구조로 되어 있다. 이러한 구조를 가진 M-ICP 식각 장치는 기존의 ICP 에서 기대하지 못했던 다양한 효과들이 발생하게 된다. 인가한 자기장으로 기존의 방전원리에 더불어 wave heating 의한 방전도 기대할 수 있고 플라즈마 confinement 효과로 인해 고밀도 플라즈마를 생성할 수 있다[46]. 또한 CCP 혹은 ICP 식각장치에 대비해서 저압에서도 공정이 가능하게 되며 시스템의 전력 전달 효율이 높고 Q 값이 상대적으로 낮아 impedance matching 이 안정적으로 이뤄질 수 있다[39].

M-ICP 식각 장치의 주요특성을 이해하기 위해서는 wave heating mechanism을 이해하는 것은 매우 중요하므로 이와 관련해서 수식적으로 살펴보도록 한다. 먼저 전자의 운동 방정식은 식 2.2.7 같이 나타낼 수 있고[46][47], 플라즈마 매질의 유전율은 식2.2.8과 같이 텐서 (dielectric tensor)로 표현된다[48]. 또한 식각 장치 내부로 전파되는 파동 방정식은 식 2.2.9 와 같다.

$$m \frac{d\vec{v}}{dt} = -e(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) - m\nu_{en}\vec{v} \quad (2.2.7)$$

$$\vec{\sigma} = \frac{ne^2}{m_e} \begin{pmatrix} \frac{\nu_{en}+i\omega}{(\nu_{en}+i\omega)^2+\omega_{ce}^2} & -\frac{\omega_{ce}^2}{(\nu_{en}+i\omega)^2+\omega_{ce}^2} & 0 \\ \frac{\omega_{ce}^2}{(\nu_{en}+i\omega)^2+\omega_{ce}^2} & \frac{\nu_{en}+i\omega}{(\nu_{en}+i\omega)^2+\omega_{ce}^2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{\nu_{en}+i\omega} \end{pmatrix} \quad (2.2.8)$$

$$\nabla^2 E - \nabla(\nabla \cdot E) + \frac{\omega^2}{c^2} \varepsilon \cdot E = 0 \quad (2.2.9)$$

식 2.2.8 의 dielectric tensor 와 식 2.2.9 의 파동방정식으로부터 플라즈마 내부에 진행되는 파동의 dispersion relation 을 구할 수 있다. 자기장에 평행하게 진행되는 횡파의 경우 다음과 같이 주어진다.

$$k = \frac{\omega}{c} \left\{ 1 \pm \frac{\omega_{pe}^2}{\omega(\omega_{ce} \mp \omega)} \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (2.2.10)$$

위의 수식에서의 부호는 각각 R-wave (Right-handed circularly polarized wave) 와 L-wave (Left-handed circularly polarized wave) 를 의미하며 dispersion relation을 그래프로 나타내면 그림 2.2.15와 같다. R-wave는 주파수가  $\omega_R$  일 때, L-wave는 주파수가  $\omega_L$  을 가질 때 cut-off 주파수를 가지며, 이 때 파동은 반사된다. R-wave 와 L-wave 의 cut-off 주파수는 다음과 같이 나타낼 수 있다[49].

$$\omega_R = \frac{\omega_{ce}}{2} \left\{ \left( 1 + 4 \cdot \frac{\omega_{pe}^2}{\omega_{ce}^2} \right)^{\frac{1}{2}} - 1 \right\} \quad (2.2.11)$$

$$\omega_L = \frac{\omega_{ce}}{2} \left\{ \left( 1 + 4 \cdot \frac{\omega_{pe}^2}{\omega_{ce}^2} \right)^{\frac{1}{2}} + 1 \right\} \quad (2.2.12)$$



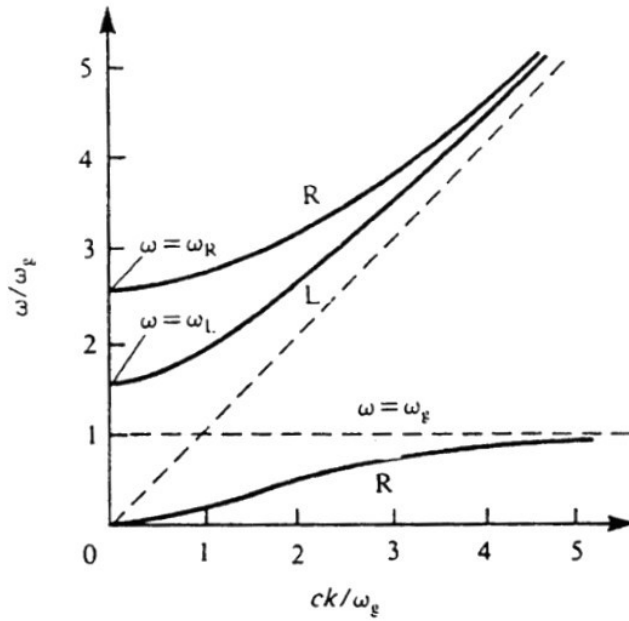


그림 2.2.15 M-ICP 장치 내 wave dispersion relation( $\omega_g$  : cyclotron frequency)[46]

M-ICP 식각 장치에서 사용되는 RF 주파수는  $\omega_{ci} \ll \omega \leq \omega_{ce} \ll \omega_{pe}$  에 해당하는 영역을 사용하고 있으며, 이 때 낮은 주파수를 가지는 R-wave 가 존재함을 예상할 수 있게 된다[46][50]. 이때 발생하는 R-wave 는  $\omega_{ce}$  의 주파수에서  $k$  값이 무한대를 가지는 resonance 주파수를 가지게 되고 파동은 전자에 흡수된다. L-wave 도 R-wave 와 같이 발생하지만 편광된 전기장의 방향과 전자의 회전방향이 반대가 되어 loss가 발생하므로 wave heating 에 도움을 주지 못하게 된다. 그림 2.2.16 에서 보는 것과 같이 R-wave 처럼 편광된 전기장의 방향과 전자의 회전방향이 일치해야 효율적인 heating 이 이뤄지게 되며 인가된 주파수가 전자의 사이클로트론 주파수와 일치할 때, R-wave 에 의한 heating 이 효율적으로 발생 하게 된다.

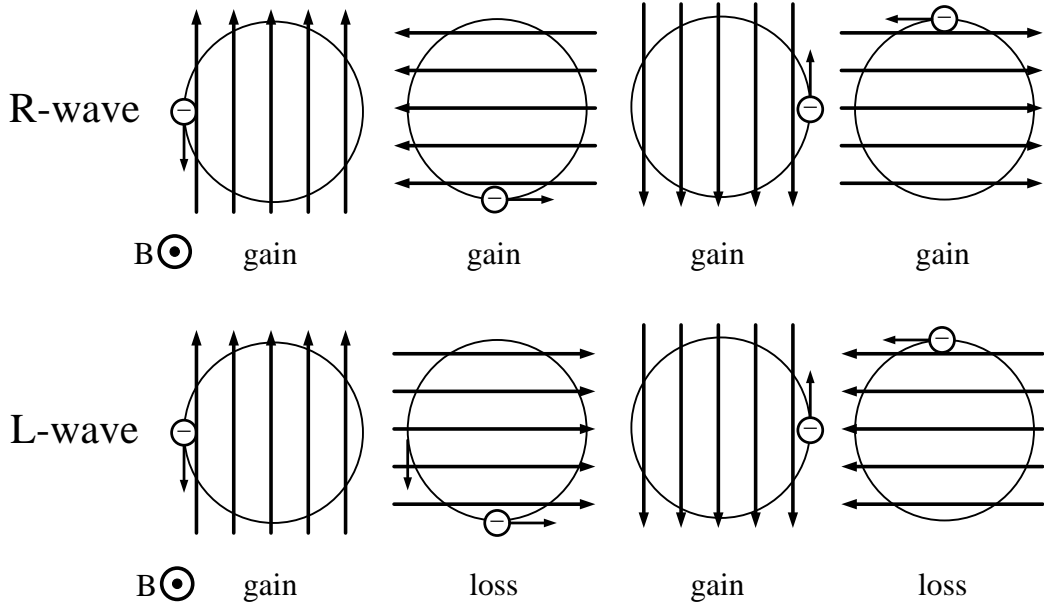


그림 2.2.16 전기장의 방향 변화와 전자 가속의 차이[49]

한편, M-ICP 식각 장치 내부의 플라즈마 밀도가 일정하지 않고 **gradient** 가 존재할 경우에는 가로축 혹은 세로축 방향으로 확산이 일어나게 되고 이때의 확산 계수  $D$ 는 다음과 같다[15].

$$D = \frac{kT}{m\nu} \quad (2.2.13)$$

확산 계수  $D$ 는 열 에너지  $kT$ 와 질량  $m$  및 충돌 주파수  $\nu$ 에 의해 결정된다. 이 때 충돌 주파수는 압력에 비례하므로 압력이 높아야 충돌주파수가 비례하게 되고 이로 인해 하전 입자의 확산 손실을 줄일 수 있게 된다.

그러나 자기장이 외부에 인가되면, 압력이 낮을수록 자장과 수직인 방향으로의 하전입자의 확산 손실이 줄어들게 되는데 이를 수식으로 표현하면 아래의 식과 같다.

$$D_{\perp} = \frac{D}{1+\omega_c^2\tau^2} \quad (2.2.14)$$

$$D_{\perp} = \frac{kT\nu_m}{m\omega_c^2} (\omega_c^2\tau^2 \gg 1) \quad (2.2.15)$$

외부에 인가된 자기장의 세기가 클수록, 압력이 낮을수록 확산계수 값은 작아지므로 자기장에 대한 수직한 방향으로의 하전 입자의 손실 역시 줄어들게 된다. 특이한 점은 자기장이 인가되었을 경우와 인가되지 않았을 경우에서 충돌 주파수  $\nu$  는 서로 상반된 역할을 하게 된다. 자기장이 없을 경우에는 충돌이 입자의 운동을 막는 역할을 하기 때문에 충돌이 많아짐에 따라 확산이 줄어들게 되고, 자기장이 인가될 경우에는 자기장을 중심으로 회전하고 있는 입자들의 guiding center 가 자기장과 수직방향으로 움직이려면 충돌이 많아질수록 유리하기 때문이다. 결국 이를 종합해보면 인가된 자기장의 세기는 클수록, 압력은 낮을수록 하전입자의 확산 손실을 줄일 수 있어서 플라즈마 confinement 의 효과를 극대화시킬 수 있다.

자화 유도 결합 식각 장치는 앞서 살펴본 바와 같은 원리들에 의하여 여러 장점들을 가지고 있다. 이를 식각에 응용하여 RIE lag 를 개선하고[51], low-k 물질의 데미지를 감소시키는 연구[52]가 보고된 바 있다. 3 장에서는 M-ICP 를 응용하여 이온 빔 식각 장치를 설계하고 이에 대한 특성에 대해 자세히 살펴보도록 하겠다.

## 2.3 다양한 플라즈마 소스를 이용한 이온 빔 식각 장치

### 2.3.1 이온 빔 식각 장치 구조와 특징

이온 빔 식각 장치의 기본적인 구조와 특징을 알아보기로 한다. 일반적인 플라즈마 식각 장치와 비슷한 발생원리를 가지고 있지만 장비의 구조나 식각 메커니즘에서 차이를 가지고 있다. 이온 빔 식각 장치의 기본적인 개념도는 그림 2.3.1과 같고 가운데 그리드를 중심으로 위쪽은 discharge chamber, 아래쪽은 propagation chamber 두 부분으로 나눌 수 있다. Discharge chamber에서 플라즈마를 방전 시킨 후 그리드에 전압을 걸어 플라즈마 내의 ion들만 그리드 아래쪽

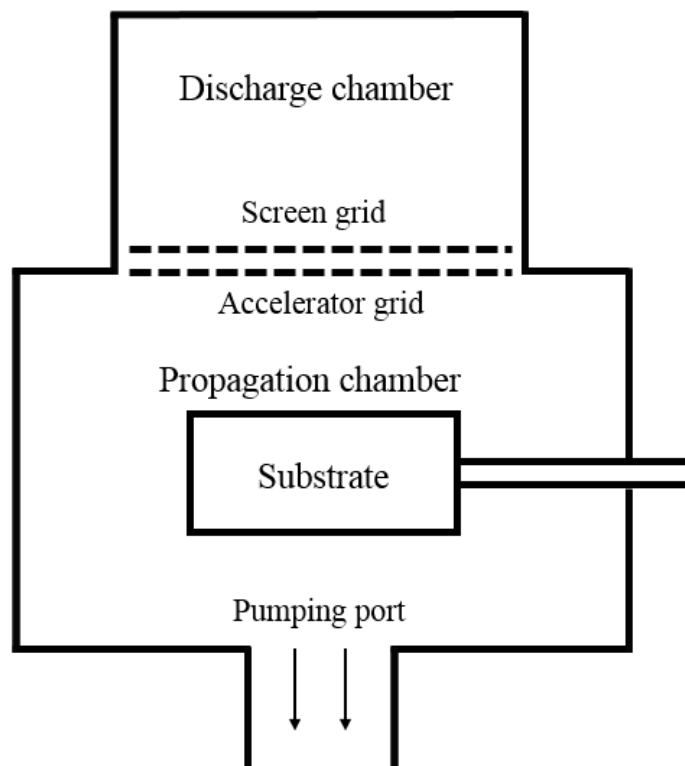


그림 2.3.1 이온 빔 식각 장치의 개념도

으로 추출하게 되고 ion들을 가속시켜 propagation chamber의 기판위의 식각하고자 하는 물질에 충돌시켜 physical한 식각이 되도록 한다. 이 때, 가장 중요한 것이 propagation chamber의 압력이다. 이는 압력이 높으면 ion들이 서로 충돌하여 에너지를 잃게 되고 기판으로 수직한 입사가 되지않아 식각이 원활히 이뤄지지 않을 수 있다. 그렇기 때문에, ion들이 서로 충돌하지 않도록 mean free path 계산하여 그 이하의 압력을 유지시킨 후 식각 공정을 진행해야 한다.

이온 빔 식각 장치에서의 discharge chamber와 propagation chamber의 사이에 있는 그리드가 매우 중요한 역할을 한다. 이온 에너지의 크기와 ion beam current의 양, 혹은 focus divergence등 식각에 관여하는 중요한 요소들이 그리드에 의해 control 된다. 그리드는 두 개의 그리드를 사용하여 디자인[53]이 가능하며 beam focus의 향상을 위해 세 개의 그리드로 디자인[54]을 할 수도 있다. 세 개의 그리드를 이용한 모습은 그림 2.3.2와 같이 나타내어 진다. Plasma와 맞닿아 있는 부분이 screen grid이며 이온을 가속 시켜주는 accelerator grid가 있고 이온들을 중성화 시켜주는 decelerator grid가 있다. Screen grid에 양의 전압을 인가하게 되면 그림 2.3.2와 같이 그리드 구멍의 위쪽으로 볼록한 sheath boundary가 형성되게 되며 이는 이온의 focus를 원활하게 해주는 핵심 역할을 하게 된다. Accelerator grid는 음의 전압을 걸어주게 되고 양의 전압이 걸린 screen grid와 수직으로 전계를 강화시켜 Screen grid를 통과한 양의 이온들을 수직으로 가속시키는 역할을 하게 된다. 세번째 그리드인 decelerator grid는 통상적으로 접지를 시키게 된다. 이는 위의 두 개 그리드를 통과한 이온들을 neutralization 시켜주기 때문에 보다 더 beam focus의 향상을 가져오는 역할을 한다. 각 그리드를 통과할 때 이온의 energy Potential variation은 그림 2.3.3과 같이 나타낼 수 있고 이온 빔 식각 장치에서의 이온 에너지의 값은 screen grid에 걸리는 전압으로 control이 가능하다는 것을 알 수 있다. Accelerator grid에 아무리 큰 전압이 걸리더라도 이는 식각에 관여하는 이온 에너지에는 영향을 줄 수 없다.

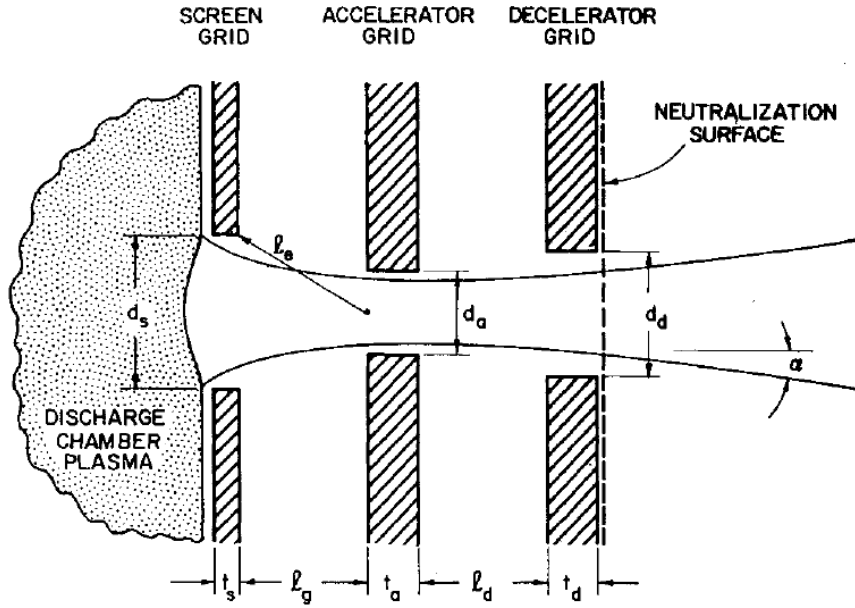


그림 2.3.2 Three grid 구조의 모습[54]

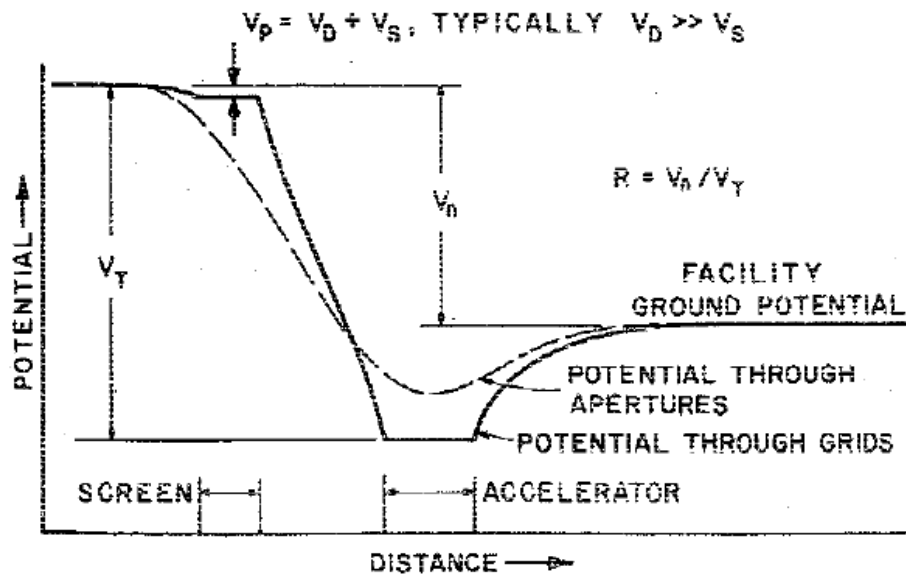


그림 2.3.3 Accelerator system potential variation[53]

그리드에 걸리는 전압 및 역할 뿐만 아니라 그리드 구멍의 물리적인 지름, 혹은 각각 그리드 사이의 간격, 각 그리드의 두께 등이 beam focus에 중요한 역할을 하게 된다[53,54]. 또한 그림 2.3.4와 같이 screen grid의 모양이 beam divergence 및 ion flux에 영향을 미치는 요인으로 작용 하기도 한다. 이처럼 그리드 설계에 의한 변수가 상당히 많고 discharge chamber에서 생성되는 plasma 밀도와도 연관이 되어있으므로 위의 모든 것을 고려하여 그리드를 디자인 해야 이온 빔 식각장치의 식각 효율을 극대화 할 수 있다.

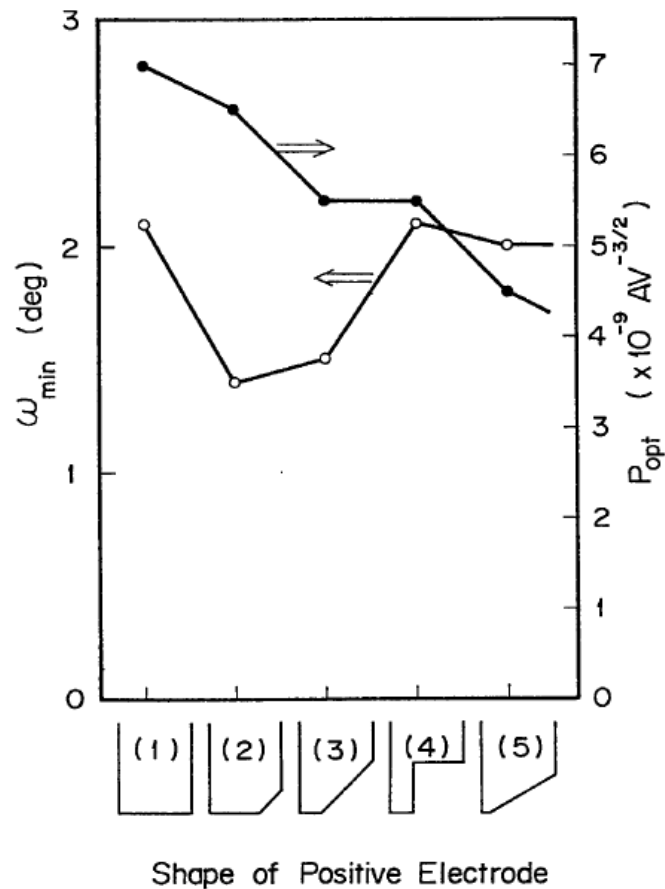


그림 2.3.4 Screen grid 모양과 beam divergence관계[55]

### 2.3.2 다양한 플라스마 소스의 이온 빔 식각 장치 종류

플라즈마 식각 장치와 마찬가지로 이온 빔 식각 장치 역시 플라즈마 소스 형태에 따라 다양하게 분류가 가능하다. 2.3.1절에서 설명한 바와 같이 기본적인 이온 빔 식각장치의 구조 및 원리는 비슷하다고 할 수 있으나 discharge chamber에서 플라즈마 생성 원리에 따라 각 장치마다 식각효율의 차이가 발생할 수 있다. 그림 2.3.5 에서 보는것과 같이 가장 간단한 구조의 필라멘트 타입이 있다. 필라멘트 타입은 발생원리와 구조가 간단하고 설계하기 쉽다는 장점이 있는 반면에 플라즈마 밀도가 낮은 단점이 있다. 플라즈마 밀도의 크기와 전자온도는 이온 빔 식각장치의 식각효율과 큰 관련이 있다[57]. 식 2.3.1에서 알 수 있듯이 이온의 밀도와 전자온도가 증가할수록 ion beam current density

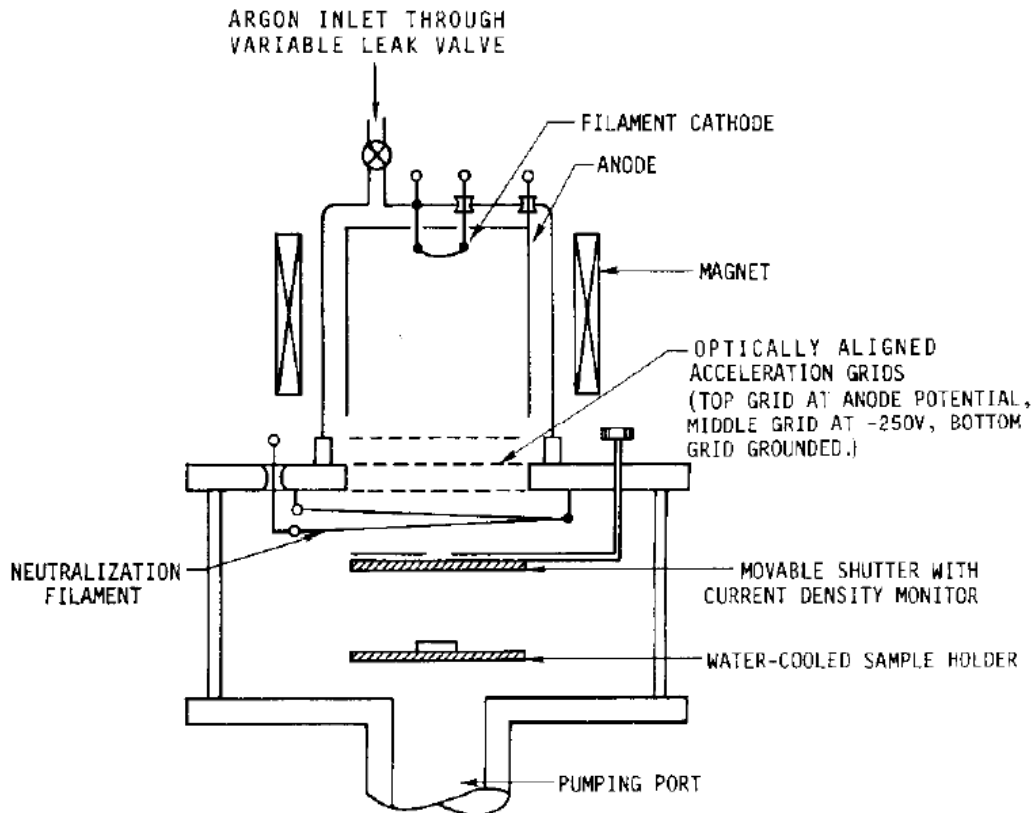


그림 2.3.5 필라멘트 타입의 소스를 이용한 이온 빔 식각 장치[56]



는 증가하게 된다. 그렇기 때문에 고밀도 플라스마 설계는 beam current의 절대적인 크기에 영향을 주게 된다. 그렇기 때문에 고밀도 플라스마

$$J_p = en_i \left( \frac{kT_e}{m_i} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.3.1)$$

구현이 용이한 ICP type[58], ECR type[59], Helicon type[60] 을 이용한 ion beam etcher에 대한 연구가 지속되었다. 그림 2.3.6은 ICP source를 이용한 이온빔 식각장치의 구조이다. 전반적인 구조는 필라멘트 타입과 비슷하지만 플라스마를 생성하는 방식이 다른 것을 볼 수 있고 고밀도 플라스마를 생성 할 수 있어 높은 ion beam current density를 기대 할 수 있는 장점이 있다.

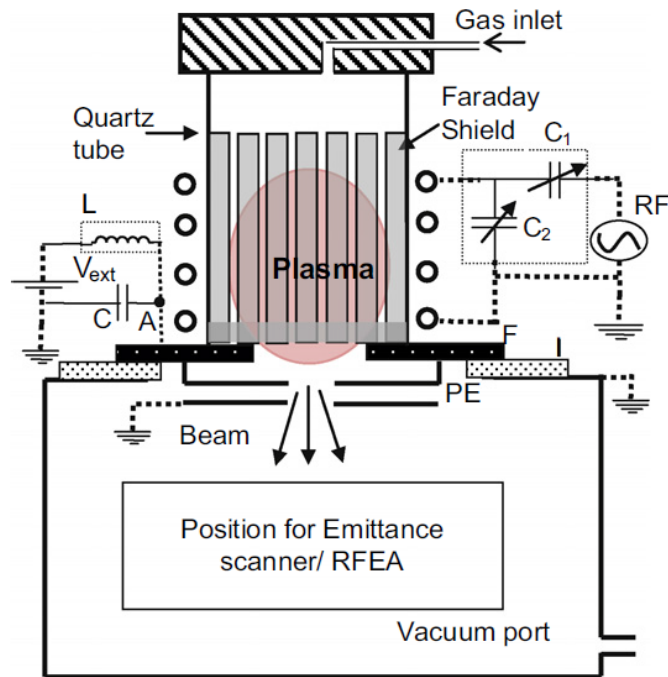


그림 2.3.6 ICP 타입의 소스를 이용한 이온 빔 식각장치[58]

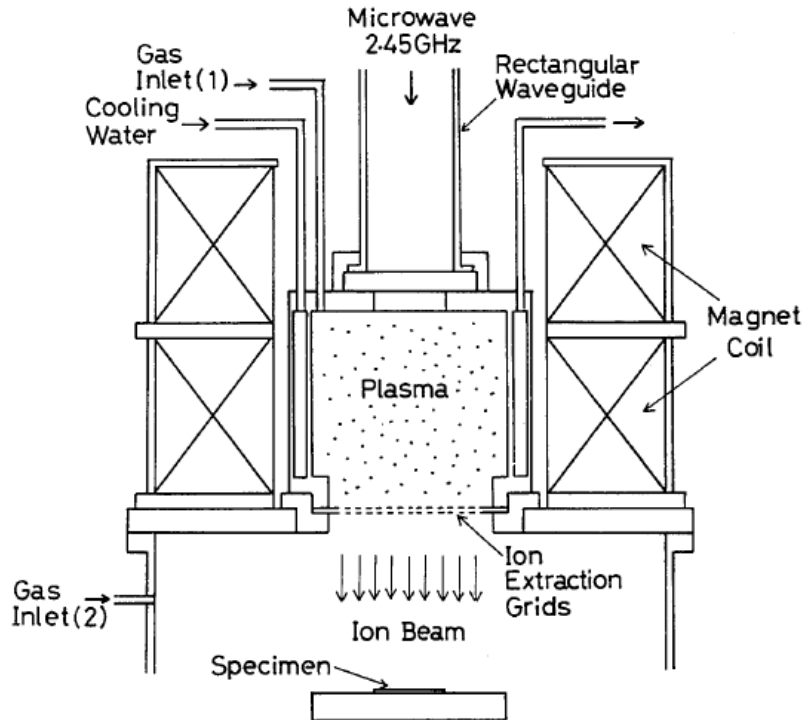


그림 2.3.7 ECR 타입의 소스를 이용한 이온 빔 식각 장치[59]

ICP type과 마찬가지로 고밀도 플라즈마 소스 구현을 위하여 ECR type을 이용한 ion beam etcher도 연구가 되어졌다. 고밀도 플라즈마를 구현할 수 있는 장점이 있는 반면에 공진을 위해 필요한 자기장의 크기가 세기 때문에 장비 구조적으로 셋팅이 어려운 점이 있다. 또한 넓은 식각면적에서 균일하게 자기장의 세기를 유지하기가 이를 유지하기 위해서는 장비가 상당히 커져하는 단점이 있다. Helicon type에 대한 ion beam etcher도 연구[60]가 되어져 왔으나 ECR type과 비슷한 이유로 널리 사용된다고 보기는 어렵다.

### 2.3.3 이온 빔 식각 장치를 이용한 선행 연구

이온 빔 식각 장치의 구조적인 특징과 종류에 대하여 살펴 보았다. 기본적인 구조는 플라즈마를 발생시킨 뒤 그리드를 통해 ion을 추출해내는 방법이라고 볼 수 있으며 ion의 물리적인 충돌을 이용하여 기판에 있는 물질을 식각한다. 이온 빔 식각 장치의 이러한 구조가 식각 측면에서 어떤 장점이 있으며 이를 이용한 최근의 연구들은 어떤 것들이 있는지 살펴보려고 한다.

일반적인 플라즈마 식각 장치의 경우에는 wafer가 놓여진 substrate에 걸리는 sheath potential을 이용하여 식각을 진행하게 된다. 즉, 동일한 재질의 평평한 기판이 있다면 항상 기판에 수직하게 sheath가 생기게 되고 식각에 이용되는 이온들과 중성종, radical들은 전부 수직하게 입사를 하게 된다. 그러나 이온 빔 식각 장치의 경우에는 discharge chamber에서 플라즈마를 발생시킨 후 그리드를 통과시켜 이온들만 추출해내는 구조로 되어 있기 때문에 propagation chamber에서의 입사되는 이온들의 입사각을 임의대로 조절 할 수 있게 된다. 이는 wafer가 놓여진 substrate를 임의대로 기울여서 이온의 입사각 control을 할 수 있게 되는 것이다. 이러한 기능은 플라즈마 생성하는 곳과 식각되는 물질이 놓여진 곳을 중간에 그리드를 놓음으로써 분리가 되고 이는 이온들을 이용한 sputter 식각만 하는 목적이라면 입사각 변화라는 변수를 사용자가 control 할 수 있게 된다. Substrate의 기울기 변화라는 변수를 이용하여 최근에는 이온 빔 식각 장치가 다양하게 응용되고 연구가 진행되고 있다.

초기에 이온 빔 식각 장치에 대한 선행 연구들은 ion beam current density에 초점을 맞춰서 진행이 되어졌다. 그림 2.3.8과 같이 screen grid와 accelerator grid의 기하학적인 parameters의 변화를 통한 고찰[61]도 그 부분 중 하나였다. 각 그리드의 두께와 폭, 두 그리드 사이의 거리등을 바꿔서 이온 빔의 기본적인 특성을 알아보는 실험이었다. 각각의 그리드 변수를 다양하게 변화를 주어 실험을 함으로써 빔이 최적화 되려면 어떠한 구조로 그리드가 디자인 되어야 하는

지에 대한 연구는 지속적으로 진행이 되어왔다. 그리드의 모양에도 변화를 주어 빔을 최적화 시키려는 연구도 지속적으로 진행이 되어져 왔다[55,62].

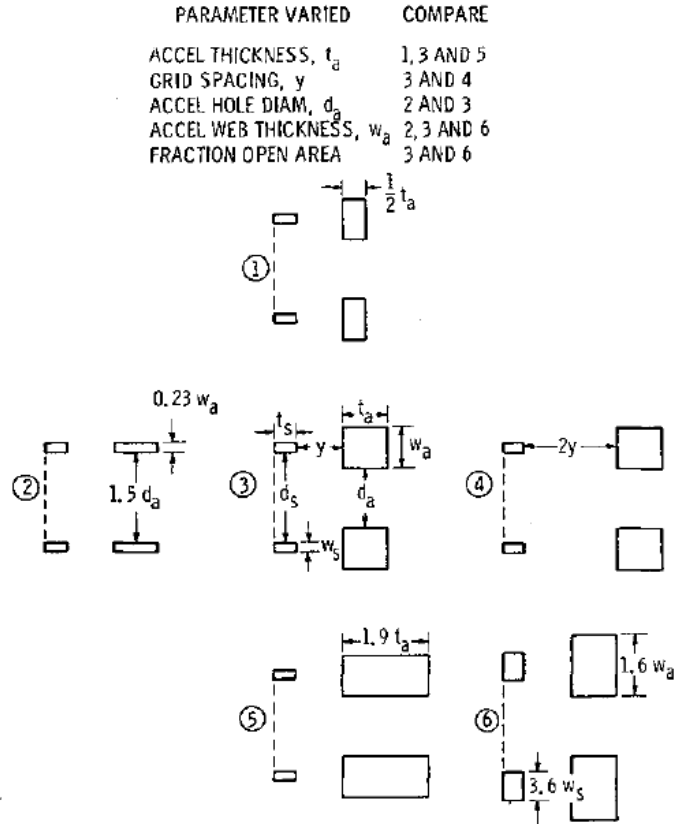


그림 2.3.8 그리드의 기하학적인 변화를 통한 실험 설계[61]

최근에는 이온 빔 특성에 대한 연구에 한정시키지 않고 이 장비를 응용하여 일반적인 플라즈마 식각장치로는 해결하기 어려운 이슈들을 다루기 시작하였다. 그 중 대표적인 것이 차세대메모리로 각광받고 있는 것 중 하나인 MRAM (magnetic random access memory) 식각에의 응용이다[63-65]. MRAM의 구성물질들 중에는 다양한 metal 물질들이 겹겹이 stack되어져 있으며 이를 식각하기 위해 일반적인 식각 장비를 이용하게 되면 metal 물질들이 식각이후에 패턴의

sidewall에 재증착 된다. 이는 소자 특성에 심각한 손상을 초래하며 소자 동작마저도 제한시키는 요소가 된다. 자세한 MRAM의 관한 설명은 본 논문 5장에서 다루도록 하겠다. 이를 해결하고자 그림 2.3.9과 같이 기판이 tilt와 rotation을 하게 되며 이 기능을 이용하여 sidewall에 붙은 metal입자들을 식각하는 방법을 사용하게 된다.

이온 빔 식각 장치를 사용하게 되면 패턴 측면에 붙은 metal 입자들의 제거는 용이 하지만 MRAM소자의 측면을 직접 ion 의 충돌로 제거하는 것이기 때문에 ion에 의한 damage 문제를 생각하지 않을 수 없다. 소자 전체가 마이크로 단위 정도로 매우 크다면 이온에 의한 damage의 영향도 미미할 수 있지만 나노 디바이스에서의 이온 damage는 절대 무시 할 수 없고 매우 중요한 요소로써 소자의 특성을 좌우하게 된다. 그렇기 때문에 이온 빔에 의한 식각 후 소자 데미지를 줄이기 위한 연구[66-68]는 지속적으로 진행되어져 오고 있으며 최근에도 가장 이슈가 되는 부분이기도 하다.

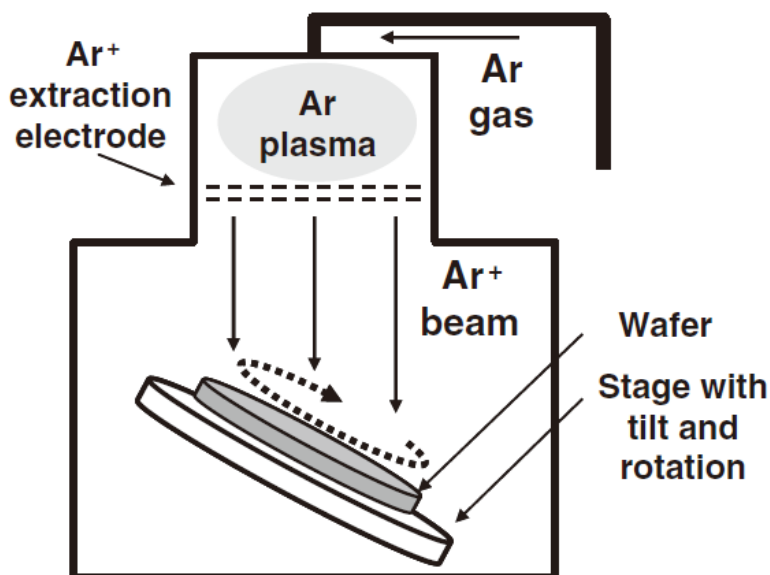


그림 2.3.9 기판 tilt와 rotation이 가능한 이온 빔 식각 장치[64]

또한 이밖에도 이온 빔 식각 장치의 대면적화에 관련된 연구[69,70]도 지속적으로 되어져 왔다. 이온 빔 식각 장치의 고유의 특징이라고 할 수 있는 빔의 분포는 그림 2.3.10과 같이 센터의 이온 빔의 세기가 강하고 기판의 edge로 갈수록 약한 가우시안 분포를 가지게 된다. 이와 같은 형태의 빔의 분포를 가지게 되면 wafer 전체에서의 uniformity는 상당히 좋지 않게 나올 것이다. 반도체 공정에서의 수율은 회사의 수익과 직결되는 부분이기에 uniformity의 개선 문제도 또한 큰 이슈로 자리잡고 있는 부분이기도 하다. 대면적화 문제는 어느 공정에서나 최종적으로 큰 이슈가 되고 있으며 이를 해결하기 위해 다양한 연구가 진행되고 있다. 이를 통해 반도체 산업 발전에 크게 이바지하기 위해 많은 연구자들이 노력하고 있다. 본 논문 또한 이에 맞춰 새롭게 디자인한 이온 빔 식각 장치에서 MRAM에 사용되는 물질들을 식각하여 기본적인 특성을 본 이후에 균일도를 개선하고자 하는 연구를 진행하였다.

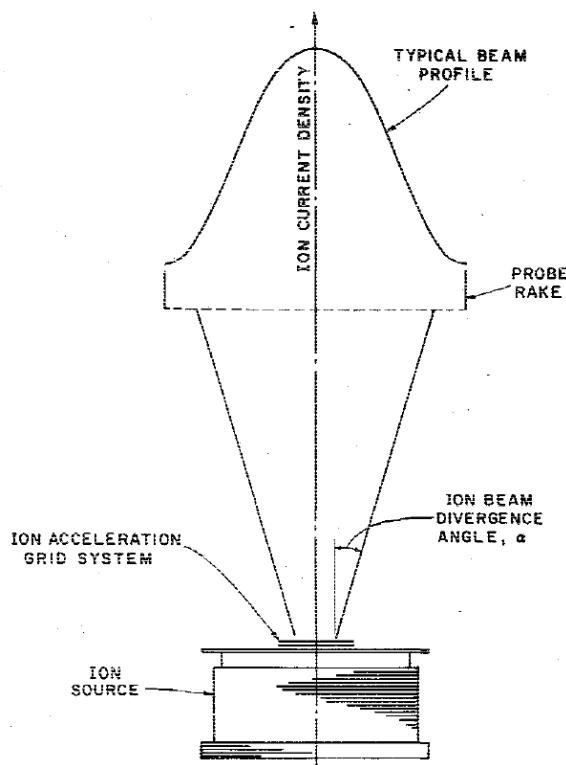


그림 2.3.10 이온 빔 식각 장치의 일반적인 beam의 분포[53]

### 제 3 장 M-ICP 이온빔 식각 장치 설계 및 방전 특성

제 3 장에서는 본 연구에서 사용된 M-ICP 이온 빔 식각 장치의 구성 과정과 설계가 완료되었을 때의 discharge chamber 에서의 방전 특성 및 propagation chamber 에 놓여져 있는 기판에서의 ion beam 특성을 살펴보고자 한다.

기존의 플라즈마 식각 장치에서 M-ICP source 를 이용한 연구가 진행된 바 있다[72]. 연구된 결과에 의하면 식각되는 물질이 놓여있는 기판을 기준으로 원하는 자기장을 세기를 인가하기 위하여 bobbin 의 반경, copper coil 이 bobbin 에 감긴 횟수, 코일이 감겨있는 bobbin 의 위치 등을 설계하였다. 일반적인 플라즈마 식각 장치와는 다르게 이온 빔 식각 장치에서는 discharge chamber 와 이온들이 진행하는 propagation chamber 가 중간에 그리드 (screen grid and acceleration grid) 를 통하여 분리되어 있으며 그리드 위쪽인 discharge chamber 에서만 플라즈마가 생성된다. 플라즈마 식각 장치와 이온 빔 식각 장치의 구조적인 상이성 때문에 이온 빔 식각 장치에서는 자기장의 세기를 맞추는 기준점이 플라즈마 sheath 가 형성되는 지점인 스크린 그리드가 된다. 스크린 그리드에서 원하는 자기장의 세기를 인가하는 설계를 하기 위해 Biot-Savart's law[73]를 토대로 예측한 후 무료배포용 소프트웨어인 FEMM (Finite Element Method Magnetics)에 대입하여 magnetic flux density 의 공간분포를 확인해보았다. 시뮬레이션을 통하여 얻은 값을 실제 값과 비교하기 위해 Gaussmeter 를 활용하여 그리드 위치에서의 자기장의 값을 측정하여 시뮬레이션 값과 일치함을 확인하였다.

M-ICP 이온 빔 식각 장치의 방전 특성을 분석하기 위해 DLP (Dual Langmuir Probe) 를 활용하여 플라즈마 밀도 및 전자 온도를 측정하였다. 기존에 연구된 결과와 같이 M-ICP 에서 ICP 보다 더 고밀도 플라즈마가 형성됨을 확인 할 수 있었다[47].

이온 빔 식각 장치에서 가장 중요한 것은 그리드 아래쪽인 propagation

chamber 에서의 ion flux의 양이라고 할 수 있다. 이를 측정 및 분석하기 위하여 IEA (Ion Energy Analyzer) 를 활용하였다. 자기장의 세기변화와 RF source power 에 따라 방전 및 ion flux 의 특성의 변화를 분석할 수 있었다. 이 뿐만 아니라 기본적인 이온 빔 식각 장치의 특성이라고 할 수 있는 그리드 전압에 따른 특성도 살펴 보았다. 2.3.1절에서 살펴본 바와 같이 그리드는 크게 screen grid와 accelerator grid 로 되어 있으며 두 개의 그리드는 각각 positive voltage 와 negative voltage 를 인가하게 되어 있다. 이 두개의 그리드에 전압을 인가함에 따라 substrate에 입사되는 이온 빔의 특성이 변화하게 되고 최적화된 그리드 전압이 존재할 수 있음을 확인하였다. M-ICP 이온 빔 식각 장치의 구성 방법 및 3D 상의 모습, 방전 특성, 이온 빔 특성 등의 자세한 내용들은 이어지는 절에서 차례대로 설명하도록 하겠다.



## 3.1 M-ICP 이온 빔 식각 장치 구성 및 전자석 설계

### 3.1.1 FEMM 시뮬레이션을 이용한 전자석 모델링

FEMM (Finite Element Method Magnetics) 은 유한 요소법 (FEM : Finite Element Method) 에 근거하여 자기장의 2D 공간 분포를 시뮬레이션 할 수 있는 기능을 가진, 온라인에서 쉽게 구할 수 있는 무료 배포용 소프트웨어이다. 유한 요소법이란 BVP(Boundary Value Problems) 에서 근사 해를 구하는 수치해석 방법 중의 하나이다[74].

유한 요소법을 사용하게 되면 그림 3.1.1의 왼쪽 그림과 같이 삼각형으로 mesh가 생성이 되게 되며 이의 삼각형 domain 마다 근사 해를 도출하여 2D 로 그림을 생성할 수 있다. 이 때, 세 개의 지점들로 이뤄지는 subdomain 내부의 전위나 자기장의 분포는 linear 하다고 가정할 수 있기 때문에 그림 3.1.1의 오른쪽과 같은 그림을 도출해 낼 수 있게 된다. 그림 3.1.2 는 FEMM 소프트웨어에 chamber와 전자석의 크기를 실제 치수에 맞게 도시한 모습이다. 프로그램 상에서는 axis symmetric 한 solution 을 구할 수 있기 때문에 중심 축을

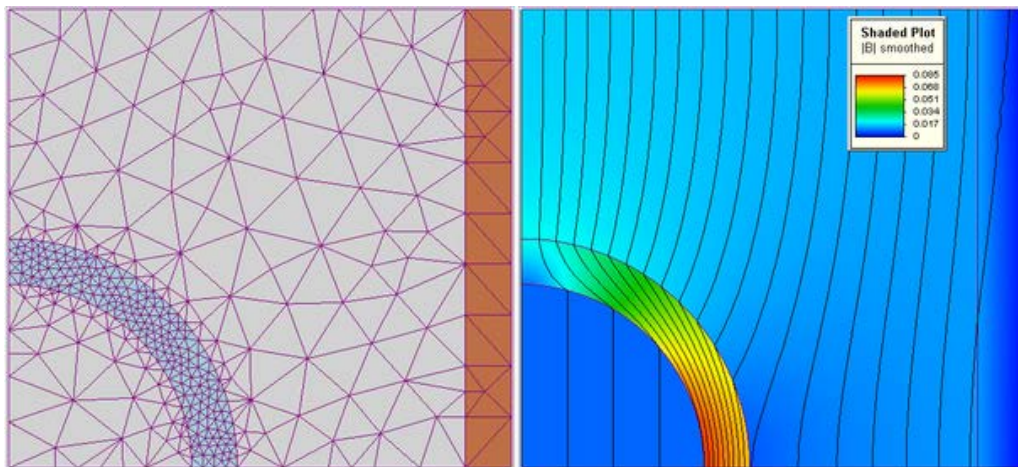


그림 3.1.1 유한 요소법을 이용한 domain 근사화 [74]

기준으로 오른쪽 부분만 도시하여 모델링을 진행 하였다. Chamber는 그리드를 중심으로 위쪽은 discharge chamber 와 아래쪽은 propagation chamber가 있지만 시뮬레이션 상에는 중간에 구분을 두지 않고 하나의 chamber로 도시하였다.

그림 3.1.2 에서 폭이 좁은 chamber의 위쪽 부분이 discharge chamber 부분이고 폭이 넓은 아래쪽이 propagation chamber이다. 전자석은 총 세 개로 놓고 모델링을 진행하였다. 전자석의 위치는 센터 축을 기준으로 각각, 300mm와 350mm가 떨어지도록 도시하여 모델링을 진행하였으며 실제로는 원형모양으로

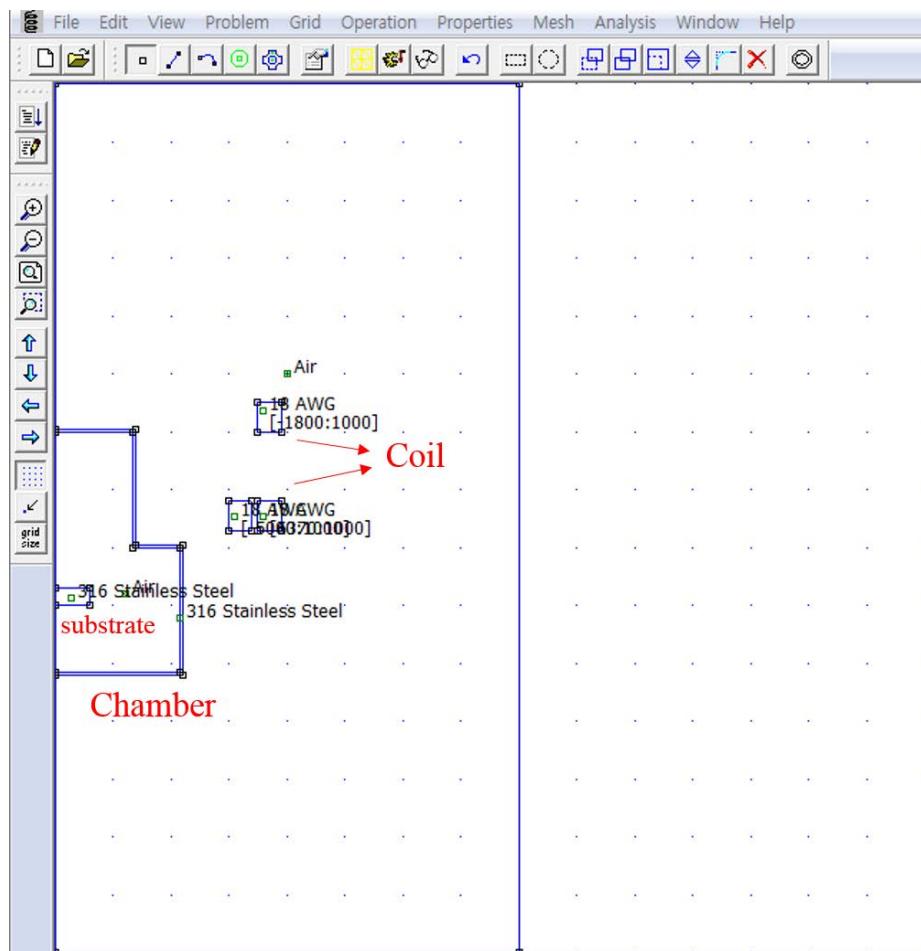


그림 3.1.2 FEMM을 이용한 M-ICP 이온 빔 식각 장치의 모델링

coil이 존재하여 전류를 흘려 자기장을 발생시키는 역할을 하게된다. Copper coil 감긴 틀을 bobbin 이라고 하며, bobbin 은 copper coil 이 여러 번 감겨 있기 때문에 폭과 높이를 가지게 되는데, 폭은 40mm, 높이는 50mm로 설정하였다. Bobbin 의 폭과 높이의 수치는 실제로 Copper coil 이 1000회 감길 때 생기는 부피라고 할 수 있겠다.

실험에 필요한 자기장의 세기와 방향을 얻기 위해서 총 세 개의 전자석중에 바깥쪽 전자석 두 개에만 전류를 흘리더라도 모델링이 가능함을 확인 할 수 있었다. 그러나 다양한 자기장의 구배를 만들어 연구하기 위해서는 세 개 이상의 전자석을 사용한 모델링이 필수적이라고 할 수 있겠다.

### 3.1.2 M-ICP 이온 빔 식각 장치의 구성

그림 3.1.3은 M-ICP 이온 빔 식각장치의 schematic design 이다. 2장에서 설명하였던 바와 같이 이온 빔 식각 장치는 기본적으로 플라즈마를 발생시키는 공간인 discharge chamber 와 그리드를 통과한 ion 들이 propagation 하는 공간인 propagation chamber 로 구성이 되어 있다. Discharge chamber 위쪽에는 플라즈마를 발생시키는 안테나가 있으며 안테나와 discharge chamber 사이에는 RF window 가 있으며 재질은 quartz 를 사용하였다. RF antenna 는 pipe 형태로 제작하여 플라즈마 방전으로 인한 과열을 막는 냉각수를 흘릴 수 있도록 제작하였다. Source power 의 RF 주파수는 27.12MHz 를 사용하였으며, impedance

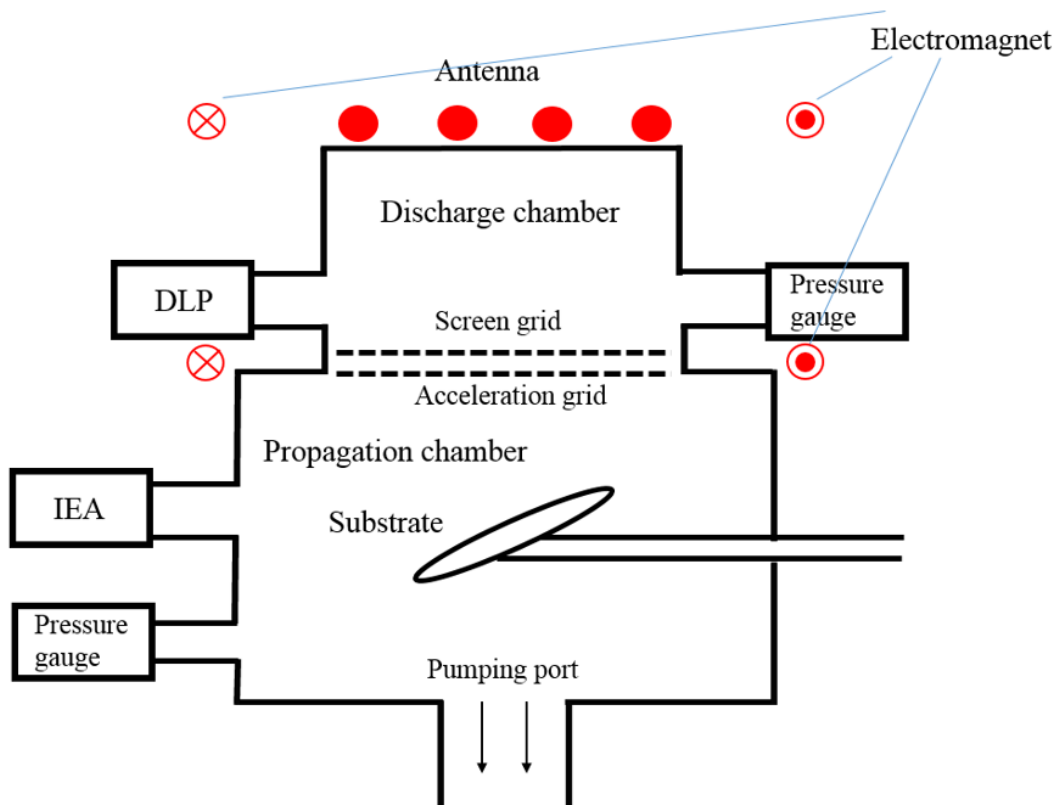


그림 3.1.3 M-ICP 이온 빔 식각 장치의 schematic design

matching network 는 그림 3.1.4 에서 보여지는 3-D 모형과 같이 antenna 위쪽에 직사각형 box 형태로 제작되어 설치되어 있다. Discharge chamber 내로 가스가 들어오게 되며, discharge chamber 에는 플라즈마 밀도와 전자온도를 측정할 수 있는 측정 port 와 압력을 측정할 수 있는 port 가 있다. 전자석은 플라즈마가 생성되는 곳 주위에 설치가 되어야 하기 때문에 discharge chamber 주위로 설치가 되어 있으며, 안테나와 수평한 위치에 원형으로 전자석이 설치되어 있고 그리드 모듈과 수평한 위치에 또다른 전자석이 설치 되어 있다. Discharge chamber 와 propagation chamber 를 구분 짓는 것이 그리드 모듈이다. 현 시스템에서 그리드는 총 두 개를 사용하고 있다. 플라즈마와 직접 닿고 있는 그리드를 screen grid 라고 하며, 그 아래쪽의 그리드를 acceleration grid 라고 한다. Screen grid 는 positive voltage 를 인가하며 discharge chamber 와 전기적인 short 상태를 유지하게 된다. 기판으로 입사되는 ion energy 를 컨트롤 하는 역할을 하며, acceleration grid 는 negative voltage 를 인가하며 이온들을 가속시키는 역할(ion flux 증감)을 한다. 두 그리드의 가변에 따른 특성변화는 3.5 장에서 자세히 살펴보기로 한다. 우선, propagation chamber 의 wall 은 접지상태를 유지해야 하기 때문에 discharge chamber 와는 전기적으로 절연 상태여야만 한다. Propagation chamber 는 그리드를 통과한 ion 들이 기판으로 입사하는 공간이다. 그렇기 때문에 이온들의 mean free path 를 계산하여 이에 맞는 매우 낮은 압력으로 만들어줘야 한다. 따라서, propagation chamber 에서 압력을 측정하기 위한 pressure gauge port 가 있으며, 통상적으로 이온 빔 식각 장치의 압력을 측정하게 되면 discharge chamber 보다는 propagation chamber 의 압력으로 통상적으로 사용한다. 또한, 기판으로 입사되는 에너지를 측정하는 ion energy analyzer 를 propagation chamber 내부에 설치하여 chamber 밖으로 signal 을 보내야 하기 때문에 propagation chamber 에도 측정 장비 port 가 있다. 식각하는 물질이 놓여지는 substrate 는 지름이 100mm 인 원의 형태이며 기울일 수 있는 tilt 기능과 substrate 가 자전할 수 있는 rotation 기능이 있다. 식각 공정을 할 때 이온 빔

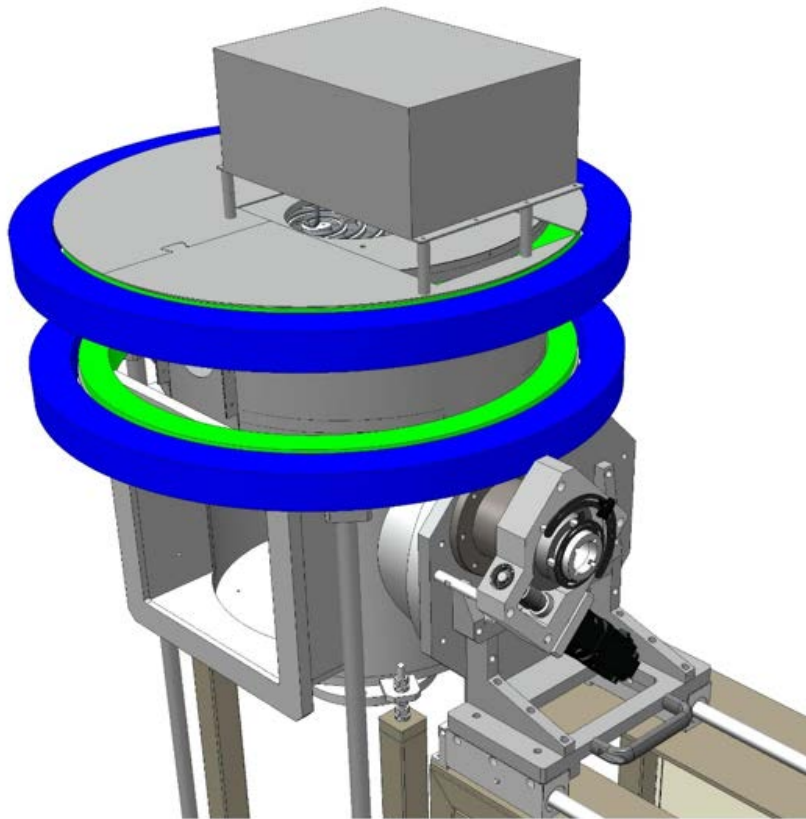


그림 3.1.4 M-ICP 이온 빔 식각 장치의 3-D 외형

이 substrate에 collision 하게 되면 상당한 열이 발생하게 되는데 이로 인한 과열을 방지하기 위해 substrate에는 별도의 냉각수를 흘릴 수 있도록 하였다. 일반적인 플라즈마 식각 장치와는 다르게 substrate 에는 별도의 RF 가 인가되지 않으므로 chamber wall 과 마찬가지로 ground 상태를 유지하게 된다. Propagation chamber 아래쪽에는 gate valve 가 있으며 그 아래에는 TMP (Turbo Molecular Pump) 가 위치한다. M-ICP 이온 빔 식각 장치의 3-D 외형을 나타내면 그림 3.1.4 와 같다.

## 3.2 자기장 최적화 설계

### 3.2.1 자기장 최적화와 관련된 이론 및 선행 연구

본 논문에 사용되는 M-ICP 이온 빔 식각 장치의 구성에서는 전자석으로 control 하는 자기장이 핵심이라고 할 수 있다. 자기장은 scalar 값이 아니라 vector 값이므로 절대적인 크기뿐만 아니라 방향도 매우 중요한 요소로 작용하게 된다. 이온 빔 식각 장치의 기준에서 다시 말하면, 자기장 크기의 기준점이 되는 이온 빔 식각 장치의 그리드 center 에서부터 반경방향과 수직축 방향으로 자기장의 공간분포에 따라 discharge chamber 내의 플라즈마 방전 특성이 달라 질 수 있다.

그림 3.2.1 과 같이 discharge chamber 내에서 플라즈마 밀도의 gradient 와 자기장이 존재하는 경우 ion 과 electron 은 서로 반대방향으로 drift 를 하면서  $\vec{F}$  방향으로 힘을 받게 된다. 이 때, 작은 파동이 있을 경우 ion 과 electron 의 drift 로 인하여 charge separation 이 발생하게 된다. 이로 인해 그림 3.2.2 의 수식과 같이 전기장  $\vec{E}$  가 형성되고  $\vec{v}_E$  의 속도로  $\vec{E} \times \vec{B}$  drift 가 발생하면서 perturbation 증폭된다. 이 증폭된 perturbation 은 flute instability 현상을 야기시키게 된다[75].

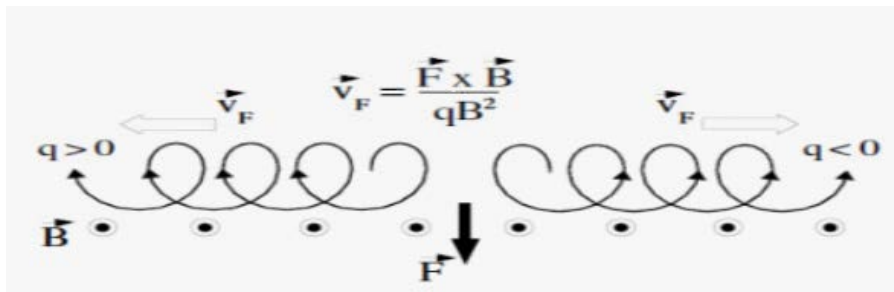


그림 3.2.1 자기장의 gradient 에 의한 drift [75]

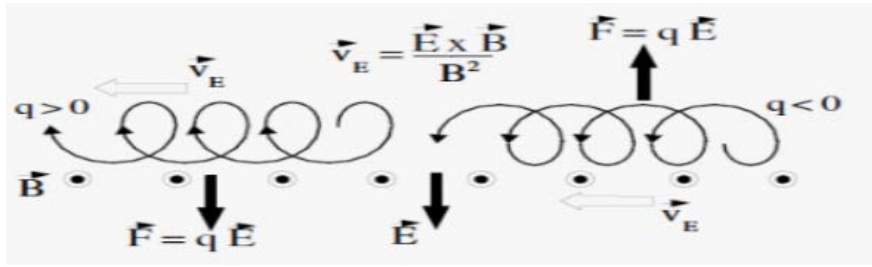


그림 3.2.2 Charge separation 으로 인해 형성된  $\vec{E}$  와  $\vec{E} \times \vec{B}$  drift [75]

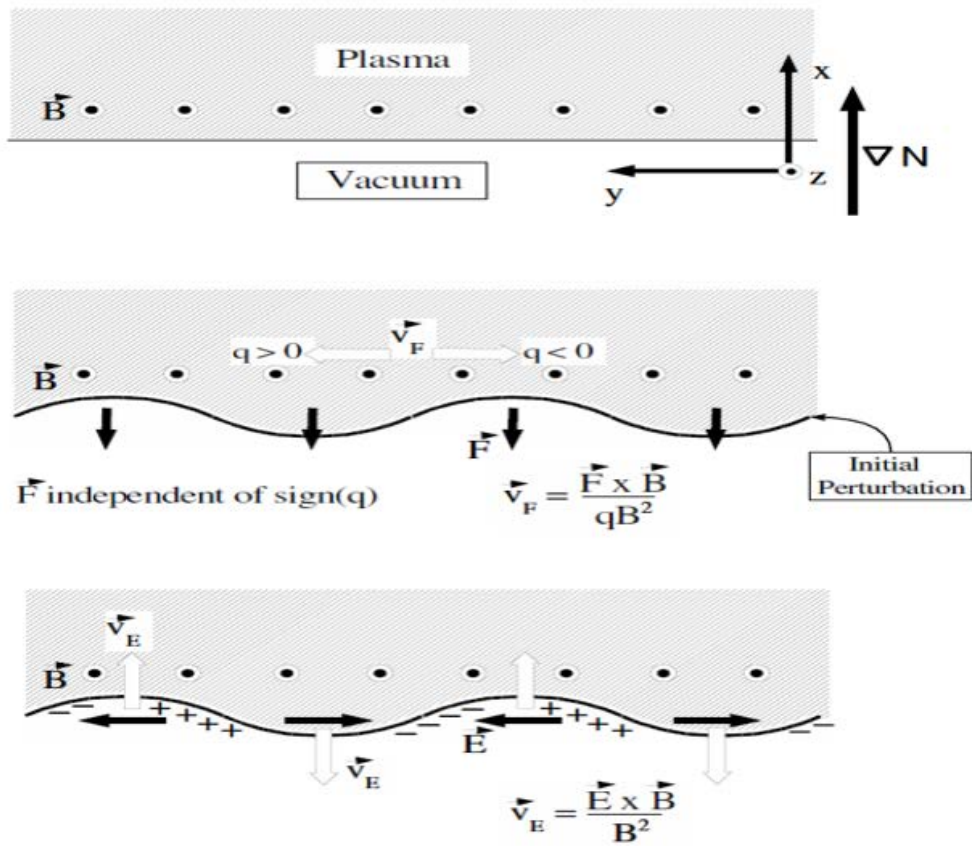


그림 3.2.3 Flute instability 발생 과정 [75]



Flute instability 현상의 발생과정을 간단하게 살펴보면 그림 3.2.3 과 같이 나타낼 수 있다. 이를 M-ICP 에 적용하여 자기장을 최적화하는 연구가 진행된 바 있다[49, 72]. 자기장의 gradient 로 인한 flute instability 의 dispersion relation 은 식 3.2.1 과 같다.

$$\omega = \frac{1}{2} k v_0 \pm \left\{ \frac{1}{4} k^2 v_0^2 + \frac{1}{m} F_{\nabla B} \cdot \left( \frac{\nabla n_0}{n_0} \right) \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (3.2.1)$$

이 수식에서 중괄호 안의 term 을 살펴보게 되면,

$$-\frac{1}{m} F_{\nabla B} \cdot \left( \frac{\nabla n_0}{n_0} \right) > \frac{1}{4} k^2 v_0^2 \quad (3.2.2)$$

조건이 성립할 때  $\omega$  가 복소수가 됨을 알 수 있다. 즉, 이와 같은 조건일 경우 flute instability 현상이 일어나게 되며, 이 수식이 의미하는 것은 자기장과 플라즈마 밀도의 gradient 가 같은 방향일 때 flute instability 현상이 발생한다는 것을 의미한다. 일반적인 discharge chamber 에서의 플라즈마 밀도는 반경방향으로 확산이 일어남에 따라 손실이 발생하게 되고 플라즈마 밀도의 gradient 는 음의 값을 가진다. 따라서 flute instability 가 생기지 않도록 하기 위해서는 자기장의 gradient 는 이와 반대되는 방향으로, 즉, 반경방향이 증가함에 따라 자기장의 세기가 증가하도록 하여 자기장의 gradient 는 양의 값을 가지도록 자기장을 설계하게 되면 flute instability 가 발생하지 않는 것을 알 수 있다.

반경방향으로의 자기장의 기울기뿐만 아니라 수직축으로의 자기장 기울기 또한 중요하다. Antenna 로부터 플라즈마가 heating 되는 mechanism 을 살펴보아야 하는데 M-ICP discharge 의 주요 mechanism 인 R-wave 의 전파

관점에서 살펴 보아야 한다. 앞의 2.2.4 절에서 설명한 바에 의하면, M-ICP에서는 input power 의 주파수인  $\omega$  가 cyclotron 주파수인  $\omega_{ce}$  보다 작아야 한다. 즉,  $\omega < \omega_{ce}$  를 만족해야 자기장에 평행 방향으로 R-wave 가 전파하고 이 파장에 의하여 electron heating 이 가능하게 된다. 본 연구에 사용된 input power 의 주파수는 27.12MHz 이기 때문에 위의 조건을 충족하기 위해서는 자기장의 세기가 9.69G 이상 되어야 한다. 뿐만 아니라 antenna 에서부터 discharge chamber 의 맨 아래쪽인 그리드 바로 윗면까지 electron heating 원활하게 되려면 수직축 방향으로  $\omega < \omega_{ce}$  관계가 항상 성립이 되어야 한다.

$$\omega_{ce} = \frac{eB}{m_e} \quad (3.2.3)$$

식 3.2.3 에 따라 자기장의 크기가 커짐에 따라  $\omega_{ce}$  가 비례하여 커지게 되고 discharge chamber 내에서 R-wave heating 이 원활하게 이뤄지려면 그리드를 중심으로 수직축으로 증가할수록 자기장도 커져야 함을 알 수 있다.

따라서 자기장의 공간분포는 그리드 센터로부터 반경방향과 수직축의 방향이 증가할수록 자기장이 모두 증가해야 discharge chamber 내에서 heating 효율을 극대화함과 동시에 flute instability 도 발생하지 않도록 control 가능함을 알 수 있다.

### 3.2.2 전류 인가 조건에 따른 자기장의 공간 분포 변화

앞 장에서 살펴 본 자기장 최적화 조건에 따르면 substrate 중심을 기준으로 반경방향 및 수직축 방향이 증가할수록 자기장이 커져야만 한다. 실제 설계에 앞서 FEMM 소프트웨어 프로그램을 이용하여 자기장 공간 분포 시뮬레이션을 진행하였다. 그림 3.2.4 는 전자석이 설치되어 있는 discharge chamber 부분의 도면만 간략히 나타낸 것이다. Discharge chamber 의 겉면에는 측정과 압력 게이지를 설치 할 수 있는 port 가 있기 때문에 전자석을 discharge chamber 벽에 붙여서는 설치할 수 없는 구조이다. 그렇기 때문에 설치가 가능한 선에서 최대한 discharge chamber 의 벽면에 가깝게 설치하고자 전자석을 그림 3.2.4 와 같이 설치하였다. 이때 Top 과 Bottom 의 전자석은 동일선상에 있으며 반지름이 350mm 이다. Top 전자석은 RF antenna 와 수평선상에 위치하며, bottom 전자석은 그리드 모듈과 수평선상에 위치하게 된다. 각 위치에 따라 자기장의 세기 및 구배가 변화하게 되는데 FEMM 시뮬레이션을 실행해본 결과 얻어진 최적의 위치는 위와 같다. 전류의 흐르는 방향에 따라 자기장의 벡터 방향이 바뀌게 되는데, 전류의 방향은 그림 3.2.4 와 같이 Top 과 Bottom 전자석 모두 시계방향이다.

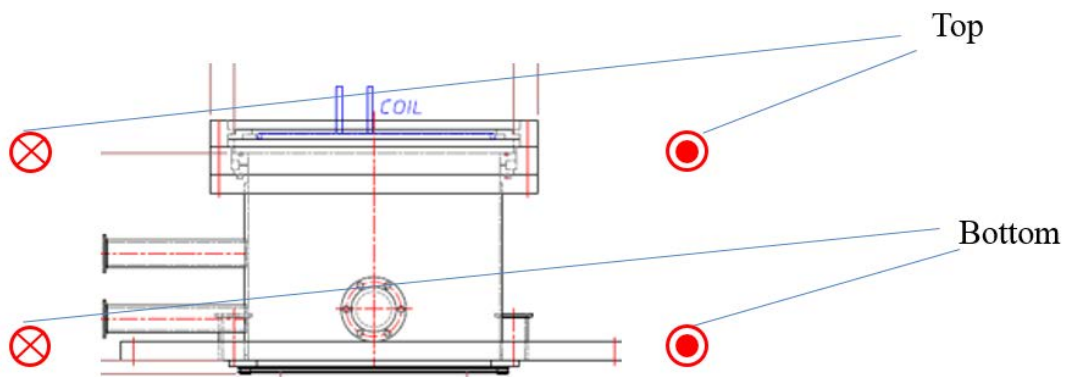


그림 3.2.4 전자석 설치 위치

	<b>Top</b>	<b>Bottom</b>
<b>2.62 G</b>	100 mA	100 mA
<b>5.25 G</b>	200 mA	200 mA
<b>7.87 G</b>	300 mA	300 mA
<b>10.5 G</b>	400 mA	400 mA
<b>13.13 G</b>	500 mA	500 mA
<b>15.75 G</b>	600 mA	600 mA
<b>18.38 G</b>	700 mA	700 mA
<b>21 G</b>	800 mA	800 mA
<b>23.63 G</b>	900 mA	900 mA

표 3.2.1 시뮬레이션으로 얻어진 전류 인가 조건에 따른 자기장 크기

반경방향과 수직축 방향으로 증가하는 자기장은 Top 과 Bottom 전자석 두개만 사용해서도 구현이 가능하였으므로 두 개의 전자석에만 전류를 흘려 그리드 센터에서의 자기장의 크기를 살펴보았다. 전자석의 개수를 추가하여 세 개 이상의 전자석에 전류를 흘리게 되면 자기장의 기울기 방향 및 크기를 변화시킬 수 있는 옵션이 있는데 이에 대해서는 제 4 장에서 자세히 살펴보기로 한다.

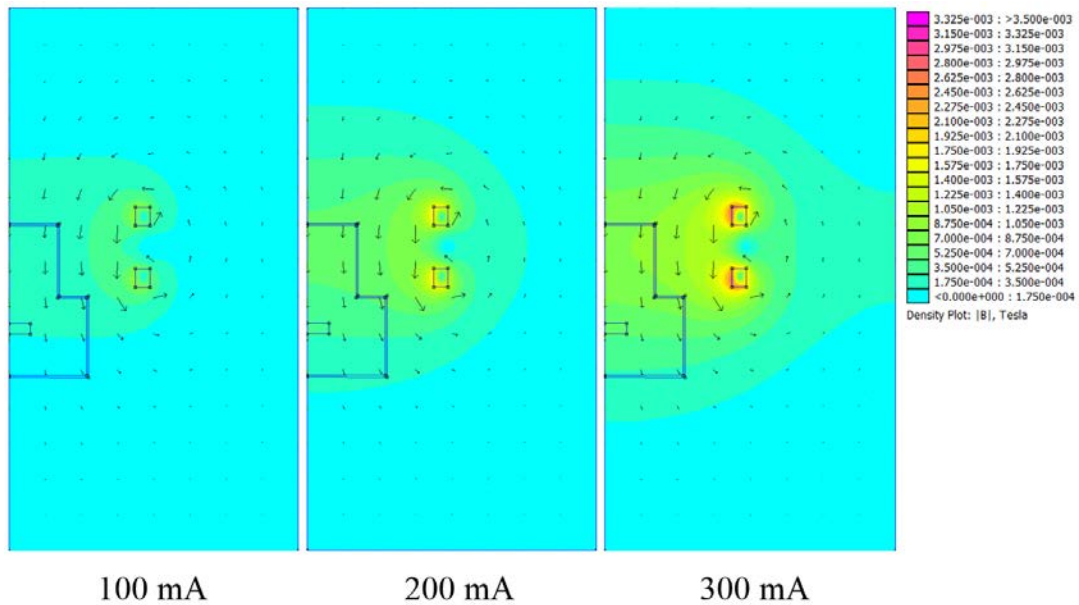


그림 3.2.5 100 mA, 200 mA, 300 mA 조건의 FEMM 결과

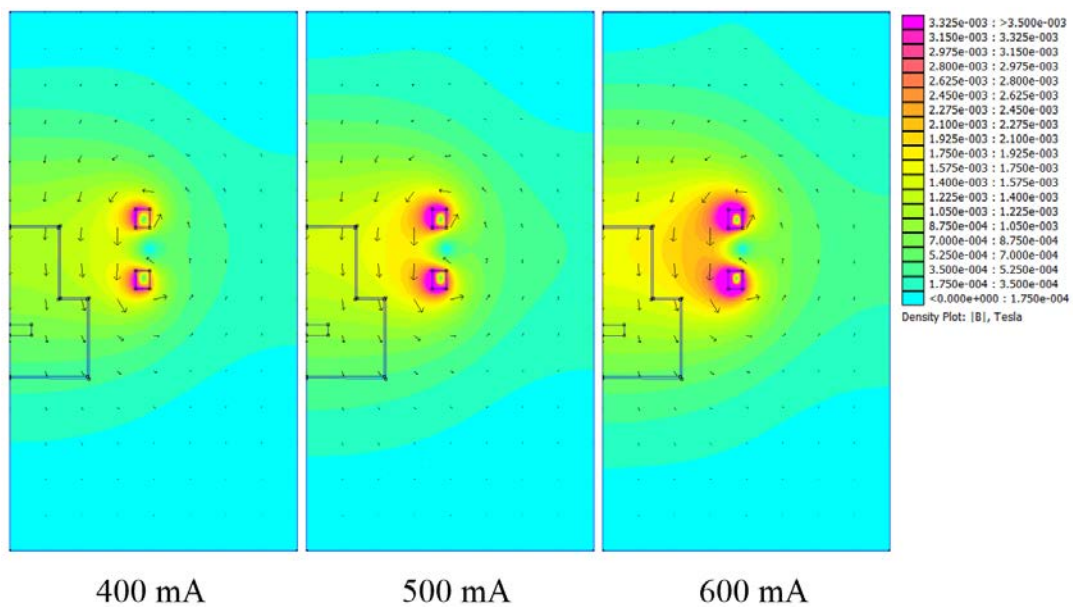


그림 3.2.6 400 mA, 500 mA, 600 mA 조건의 FEMM 결과

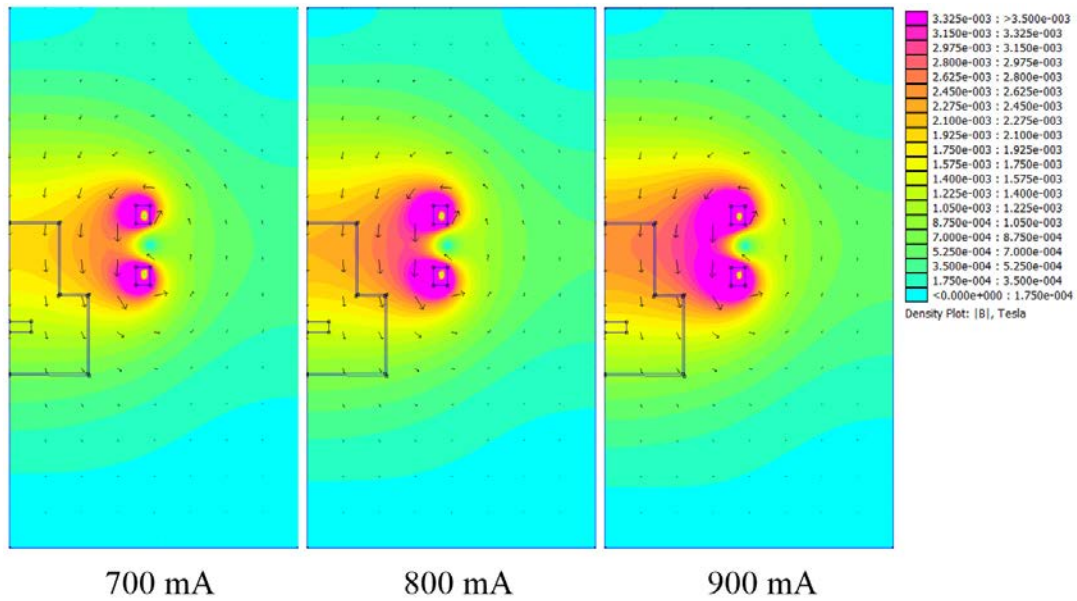


그림 3.2.7 700 mA, 800 mA, 900 mA 조건의 FEMM 결과

그림 3.2.5 ~ 3.2.7 은 FEMM 시뮬레이션을 통하여 얻은 전자석에 전류를 증가함에 따라 생기는 자기장 분포이다. Top 과 bottom outer 전자석 두 개에만 전류를 흘렸고 전류를 100mA 씩 증가 시켰다. Screen grid 의 center 에서 2.62 G 에서 23.63 G 까지 증가하는 자기장 분포를 얻을 수 있었다. 앞서 언급하였듯이 중요한 조건은 반경방향과 수직축 방향으로 거리가 증가함에 따라 자기장도 증가를 해야 하는데 이를 살펴보기 위해 각각의 전류 조건마다 거리에 따른 자기장의 크기를 그림 3.2.8 ~ 3.2.11 에 그래프로 도시하였다. FEMM 시뮬레이션 상으로 코일에 흐르는 전류를 100mA 씩 증가시킬 때 자기장의 크기를 살펴본 후, 실제 전자석에 생기는 자기장과 오차를 살펴보기 위하여 gauss meter 를 이용하여 자기장을 직접 측정해보았다. 그림 3.2.12 에서 비교된 결과와 같이 실제 장비해서 측정하였을 경우와 시뮬레이션 상에 약간의 오차는 존재 하였지만 거의 비슷함을 확인 할 수 있었다.

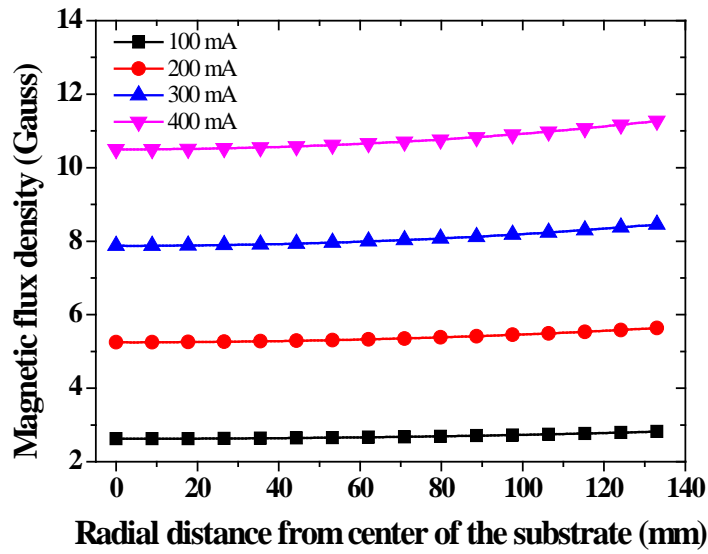


그림 3.2.8 반경 방향이 증가함에 따라 생기는 자장분포 (100mA ~ 400mA)

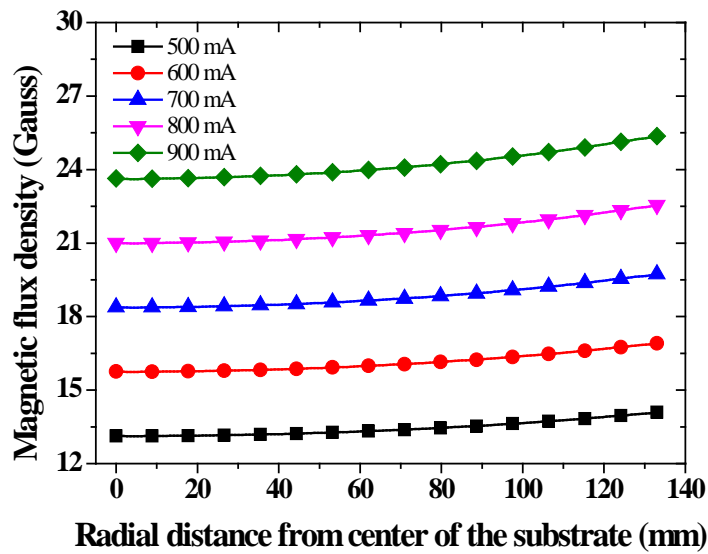


그림 3.2.9 반경 방향이 증가함에 따라 생기는 자장분포 (500mA ~ 900mA)

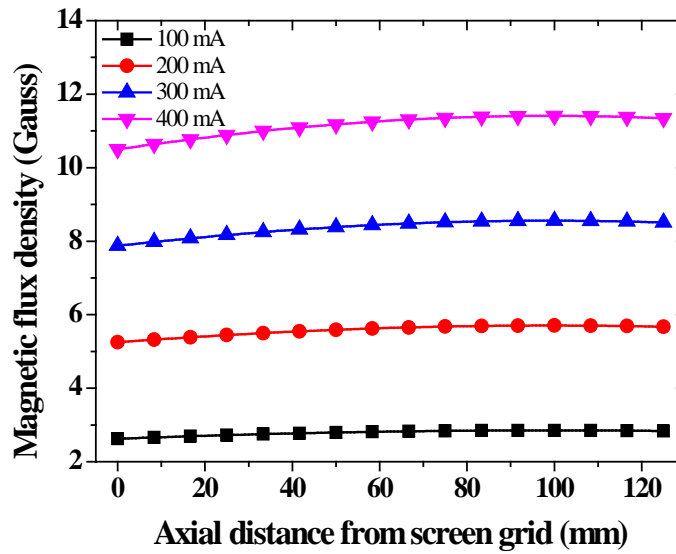


그림 3.2.10 수직축 방향에 따라 생기는 자기장분포 (100mA ~ 400mA)

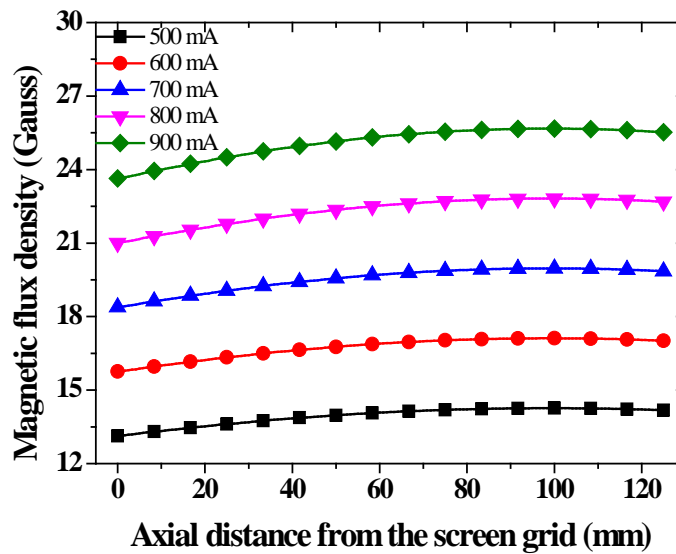


그림 3.2.11 수직축 방향에 따라 생기는 자기장분포 (500mA ~ 900mA)



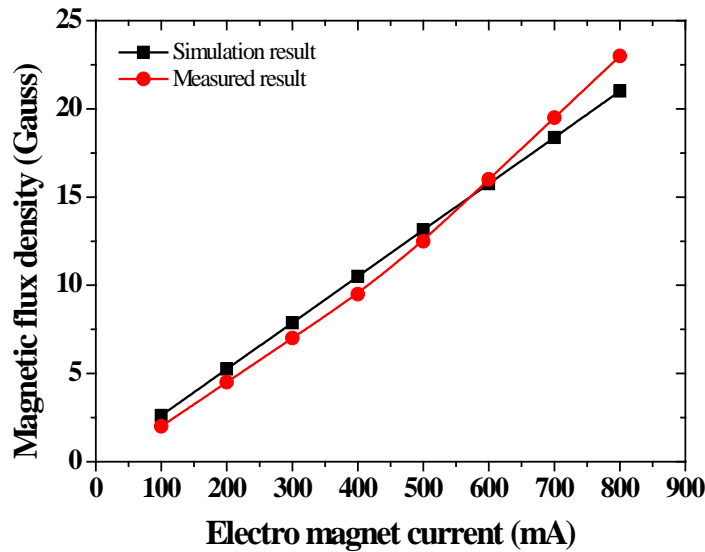


그림 3.2.12 시뮬레이션 결과와 실제 측정된 자기장 크기 비교

시뮬레이션 결과와 gauss meter 로 실제 측정된 자기장 크기의 오차의 이유로는 몇 가지를 생각해 볼 수 있다. 첫째로 가장 큰 이유로는 gauss meter 기의 digital signal 의 한계가 있기 때문이다. 연구실에서 가지고 있는 gauss meter 기는 tesla 기준으로 사용되고 있는 단위가 큰 측정기로써 작은 단위인 자기장의 세기를 측정할 때, 오차가 존재하게 되고 정밀한 측정이 가능하지 않다. 두 번째로는 시뮬레이션 상에서는 ideal 하게 자기장 주위에 물질이 air 로만 되어 있다고 setting 되어 있지만 실제 장비 주변에는 air 뿐만 아니라 SUS 로 제작된 chamber 이외에도 다른 물질들이 존재하기에 자기장 형성에 미세한 영향을 주게 된다.

### 3.3 자기장 가변에 따른 방전 및 ion beam flux 특성

#### 3.3.1 Langmuir probe를 이용한 플라즈마 진단

플라즈마 방전 및 ion beam flux 를 측정하기에 앞서 측정에 사용된 분석장비에 대해 간략히 살펴보도록 하겠다. 플라즈마의 방전 특성을 측정할 때 가장 흔하게 사용되는 변수는 플라즈마 밀도와 전자온도이다. 플라즈마의 상태를 나타내는 여러 수식들의 대부분에 위의 두 가지 변수가 들어가기 때문이다. 따라서 플라즈마 밀도와 전자온도를 측정하는 것이 중요한 이슈라고 할 수 있다. 이 변수들을 측정할 때 가장 쉽고 흔하게 사용되는 방법이 Langmuir probe 를 이용하는 것이다. Langmuir probe 란 플라즈마 내에 전극을 넣고 전류를 흘려서 측정하는 방식으로써 플라즈마 내로 들어가는 전극의 개수에 따라 single Langmuir probe (SLP), double Langmuir probe (DLP) 등으로 나뉜다. 이 중에서 본 연구에서는 DLP 를 이용하여 플라즈마 특성을 측정하였으며 측정결과에 앞서 DLP 의 측정 원리 및 방법에 대하여 살펴보려고 한다.

DLP 는 플라즈마 내에 들어가는 전극이 두 개이며 전극 사이에 isolated voltage 를 인가하는 방식이다[76]. 두 전극 면적을 같게 하는 것이 측정된 데이터로 플라즈마 밀도와 전자온도를 계산할 때 유리하며 전극 사이의 거리를 가깝게 하여 공간 분해능을 좋게 하되, 전극 사이가 너무 가까워 sheath 가 겹치지 않도록 해야 한다. 두 전극은 ground 대비 floating 되어 있기 때문에 두 전극에 인가하는 전원 소스와 플라즈마는 완벽한 폐회로를 이루고 있다. 하나의 전극에서 ion 에 의한 current 가 흐르면, 다른 전극에는 같은 양의 electron 에 의한 current 가 흐르는 방식으로 두 전류의 양은 같아야 한다. Ion 의 mass 가 electron 보다 훨씬 무겁기 때문에 mobility 도 더 낮게 되며, 두 전류의 양이 같아야 한다고 했으므로 electron current 가 ion current 에 의하여 제한이 되는 형태를 보이게 된다. 이 현상으로 인해 DLP 측정 시스템은 SLP 에 비하여

small current drain 을 제공하게 된다. 또한 DLP 전체가 floating 되어 있기 때문에 플라즈마 전위가 시간에 따라 진동을 하여도 영향을 거의 받지 않는다. 이 같은 이점들은 SLP 에 비하여 플라즈마 특성을 측정할 때 다른 noise 에 강하다는 것을 의미하며 특히, 자기장이 존재하는 실험의 경우에는 SLP 에 비해 더 정확한 결과를 낼 수 있다[76].

그림 3.1.10 을 DLP 를 이용하여 측정된 데이터를 확인 할 수 있다. 두 개의 전극으로부터 얻은 V-I 커브이며 이는 원점으로부터 대칭을 이루고 있으며 전류값은 ion saturation current 에 의하여 제한된다.

DLP 를 이용하여 구한 V-I curve 는 식 3.3.1 과 같은 관계를 가진다.

$$I = I_p \tanh\left(\frac{eV}{2kT_e}\right) \quad (3.3.1)$$

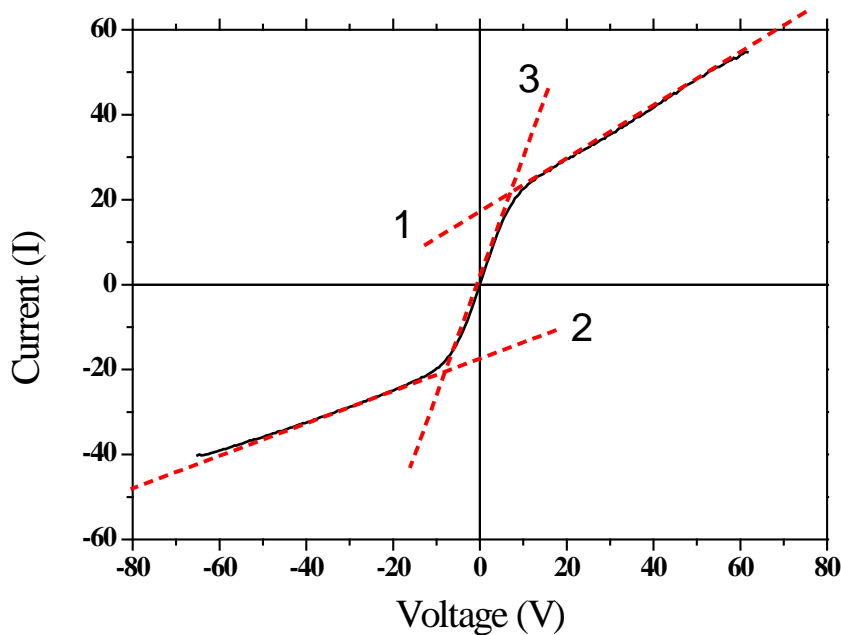


그림 3.3.1 DLP 측정결과 얻는 V-I curve

위 식을 미분하면, 식 3.3.2 와 같이 얻을 수 있다.

$$\frac{dI}{dV} = \frac{2I_p \exp\left(\frac{eV}{kT_e}\right)}{T_{ev} \left( \exp\left(\frac{eV}{kT_e}\right) + 1 \right)^2} \quad (3.3.2)$$

V 에 0을 대입한 후 정리하면,

$$\left. \frac{dI}{dV} \right|_{V=0} = \frac{eI_p}{2kT_e} \quad (3.3.3)$$

와 같이 얻을 수 있다. 위 식에서  $I_p$  는 그림 3.2.10 에서 1번 과 2번 직선의 y 절편 절대값의 평균값이고  $V=0$  일 때의 curve 의 기울기를 의미하는 3 번 직선이 식 3.3.3 의 좌변에 해당하는 값이다. 이를 이용하여 최종적으로 얻고자 하는 전자온도를 구할 수 있다. 전자온도를 구한 후 플라스마 밀도 또한 수식 3.3.4 에 대입하여 구할 수 있다. 식 3.3.4 의 A는 탐침의 면적이고  $m_i$  는 이온의 질량이다. 주어진 상수들을 모두 대입할 때 최종적으로 이온 밀도, 즉 플라스마 밀도를 구할 수 있다.

$$I_p = 0.605 n_i A e \left( \frac{kT_e}{m_i} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3.3.4)$$

### 3.3.2 Ion energy analyzer를 이용한 ion beam flux 측정

Discharge chamber 에서 만들어지는 플라즈마의 특성도 중요한 부분이지만 실제로 기관에서 식각에 관여하는 이온 에너지도 상당히 중요하다. 실제 식각에 관여하는 부분에 대한 직접적인 근거 데이터를 보완하는 일이라고 할 수 있기 때문에 이에 대한 지속적인 연구는 필수적이라고 할 수 있다. 이온에너지는 ion energy analyzer 를 이용하여 측정을 할 수 있으며 이 측정 tool 의 동작 원리와 방법을 간단하게 살펴보도록 하겠다.

이온 에너지 분석기는 금속 mesh 장벽에 전압을 인가하여 그 전압 이상의 에너지를 가지는 이온들을 받아들여 흐르는 전류를 측정하게 되고 이는 V-I curve 로 나타낼 수 있다. 이렇게 얻은 그래프를 전위에 대해 미분함으로써 이온 에너지 분포 함수를 얻을 수 있다[77-84]. 그림 3.3.2 와 같이 이온 에너지 분석기는 총 네 개의 mesh grid 와 맨 아래에 전류를 모으는 collector layer 로 구성되어 있다[50]. 위에서부터 순서대로 floating grid, electron repelling grid, discriminator grid, secondary electron suppressor grid, collector layer 이다.

Floating grid 는 플라즈마 내의 이온들이 분석기를 향해 입사하게 될 때 주변과 같은 전위로 인식하도록 만들어주는 layer 이다. 즉, 이온들이 실제로 식각될때와 유사한 환경을 만들어주기 위해서 만들어진 grid 라고 할 수 있으며 이 층이 없을 경우, 이온들이 바라보는 분석기의 전위는  $V_{electron\ repel} + V_{floating}$  이므로 이온 에너지 분포 함수를 측정할 때 오차가 생길 수 있다. 오차란, 실제 이온의 에너지보다 더 많게 혹은 더 적게 분석기에서 측정될 수 있다는 뜻이다.

Electron repelling grid 는 Christian Böhm 논문[80] 에 근거하여 적정하다고 판단되는 negative DC 전압을 인가한 grid 이다. 이 grid 에는  $-55V + V_{floating}$  전압을 인가하는데 sheath 를 통과하여 분석기로 입사하는 전자를 튕겨내는 역할을 한다. 실제로 측정하는 것은 이온에 의한 전류이므로 전자로 인해 생기는

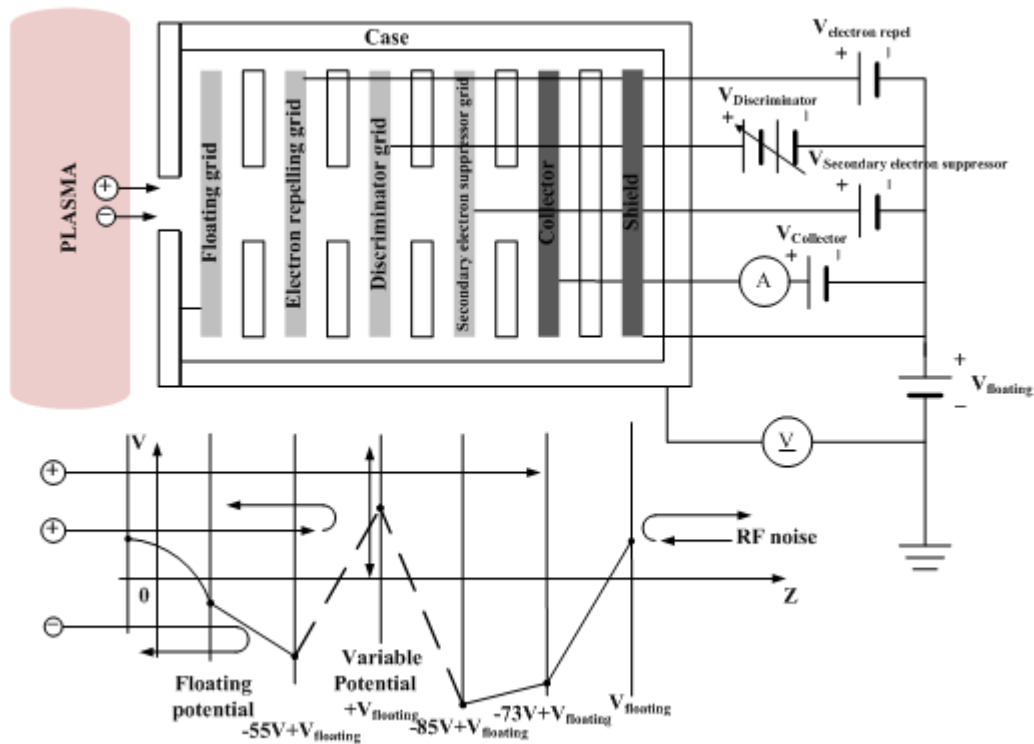


그림 3.3.2 이온 에너지 분석기의 구성 및 원리 [49]

전류를 걸러줘야 하기 때문이다. 플라스마 전자온도가  $4\text{eV}$  에 해당하는 Boltzmann distribution 을 가지고 있다고 가정할 때 99% 의 전자가 통과하지 못하는 전압이  $-55\text{V}$  으로 알려져 있기 때문에 이와 같은 Dc 전압을 fix 하게 되었다.

Discriminator grid 는 양의 전압을 점진적으로 일정하게 증가시켜가면서 인가를 함으로써 전위 장벽을 형성하는 역할을 한다. 이와 같이 점진적으로 양의 전압을 인가하게 되면 그 이상의 전위 장벽을 가진 이온들만 통과를 하게 되고 그 에너지 이하의 이온들은 튕겨 나가게 되기 때문에 적절한 이온에너지 분포를 측정하는데 매우 중요한 역할을 하게 된다.

Secondary electron suppressor grid 는 collector layer 에 이온이 충돌할 때 발생하는 이차 전자를 억제하는 역할을 한다. 이 층에는  $-84V + V_{floating}$  가 인가되며 collector layer에 인가하는 negative 전압 보다 더 음의 값을 인가하여야만 한다.

Collector layer 는 위의 네 개 grid 를 통과한 이온들을 모아주는 역할을 하는 layer 로써 mesh grid 가 아니라 금속재질의 평판으로 되어 있다. Positive 이온들을 모으기 위해서는 negative 전압을 걸어줘야 하는데 적정 전압은  $-73V + V_{floating}$  이다. 본 실험에 사용된 이온 에너지 분석기의 모습은 그림 3.3.3 과 같다.

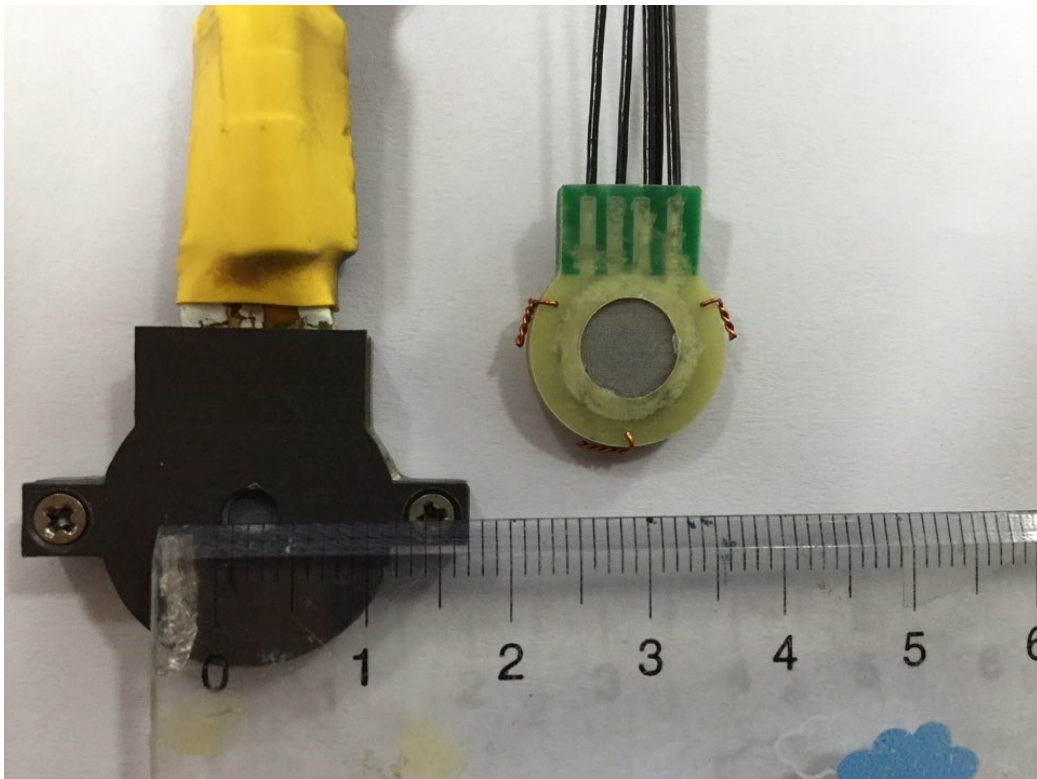


그림 3.3.3 연구실에서 제작한 이온 에너지 분석기

이온 에너지를 측정하기 위해서는 챔버 안에 들어가는 분석기만 필요한 것이 아니다. 이와 더불어 측정된 신호에서 noise 를 걸러주는 low pass filter, 신호를 증폭시켜주는 amplifier, 신호를 수집해주는 DAQ 시스템, 수집한 신호를 연산처리 해주는 컴퓨터 (소프트웨어) 가 필요하다. 분석기 외에 이와 같은 자세한 구성품들에 대한 설명은 선행연구 논문에 자세히 소개된 바 있다[50].

분석기를 통하여 얻어진 V-I curve 와 이온 에너지 분포 함수를 얻는 과정에 대하여 살펴보도록 하겠다. Discriminator 의 전압  $V_{dis}$  에 따라 collector layer 에 입사되는 이온 전류 밀도  $J_{col}(V_{dis})$  는 네 개의 mesh grid 의 투과도 T 와 분석기의 면적 A, amplifier 의 증폭 값 G, DAQ 를 통해 얻어진 전압 신호  $V_{out}$  을 이용하여 수식 3.3.5 와 같이 표현이 가능하다.

$$J_{col}(V_{dis}) = eAT \int_{V_{dis}}^{\infty} v(V_{dis}) f(v(V_{dis})) dv(V_{dis}) \quad (3.3.5)$$

우선, discriminator 의 전위장벽인  $V_{dis}$  를 통과하는 이온들의 에너지를 구해야 하고 식 3.3.6 과 같이 나타낼 수 있다.

$$v(V_{dis}) = \sqrt{\frac{2eV_{dis}}{m_i}} \quad (3.3.6)$$

이 식을 전위차-전류관계로 바꾸기 위하여 양변을 미분하면

$$dv(V_{dis}) = \sqrt{\frac{e}{2m_i V_{dis}}} dV_{dis} \quad (3.3.7)$$

식 3.3.7 과 같이 얻을 수 있고 이 식을 다시 전류를 구하는 수식에 대입하면



$$J_{col}(V_{dis}) = \left(\frac{e^2 AT}{m_i}\right) \int_{V_{dis}}^{\infty} f(V_{dis}) dV \quad (3.3.8)$$

식 3.3.8 을 얻을 수 있다. 따라서 이온 에너지 분포 함수와 discriminator 에 걸린 전압과의 관계를 수식으로 표현 하면 식 3.3.9 와 같다.

$$f(V) = \left(\frac{m_i}{e^2 AT}\right) \frac{dJ_{col}(V_{dis})}{dV_{dis}} \quad (3.3.9)$$

위의 식에서 알 수 있듯이 discriminator 에 걸린 전위를 통과해 흐르는 collector 전류를 미분하면 이온 에너지 분포 함수를 구할 수 있다.

그림 3.3.4 는 collector layer 에 흐르는 일반적인 전류-전압 곡형의 모습이다. 가로축은 discriminator 에 의해 걸리는 전위를 의미하며 세로축은 collector 에 흐르는 전류를 의미한다. 이렇게 측정된 V-I 그래프를 식 3.3.9 의 결과와 같이 미분을 해주면 그림 3.3.5 과 같은 이온 에너지 분포 함수가 된다.

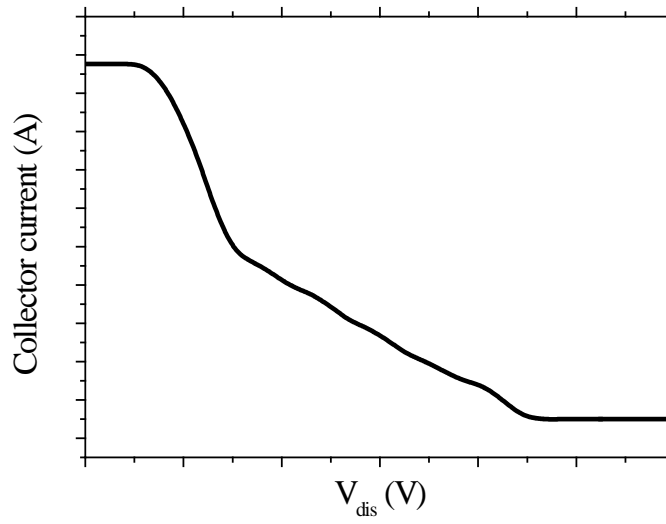


그림 3.3.4 측정을 통해 얻은 V-I curve [49]

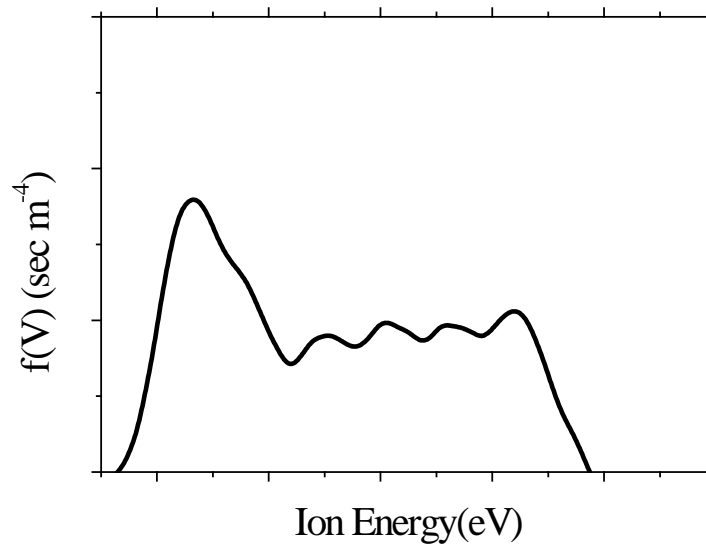


그림 3.3.5 V-I curve 를 미분하여 얻은 이온 에너지 분포 함수 [49]

### 3.3.3 자기장 세기에 따른 방전 특성

본 절에서는 3.3.1 절에서 살펴본 double Langmuir probe 를 이용하여 자기장의 세기가 변화할 때 플라즈마 방전 특성을 살펴보도록 하겠다. 앞서 언급한 바와 같이 double Langmuir probe 는 floating 되어 있는 상태에서 측정이 가능하기 때문에 자기장이 chamber 주위에 인가된 상태에서도 single Langmuir probe 보다 noise 가 상대적으로 적고 측정에 용이하다.

그림 3.3.6 은 플라즈마 방전특성을 측정하기 위해 연구실에서 자체 제작한 double Langmuir probe 이다. 이것을 discharge chamber 에 넣기 위해서는 그림 3.3.7 과 같은 feed through 가 필요한데 검은 세라믹으로 제작되었으며 probe 에 흐르는 전류를 DLP 측정 시스템에 전달 할 수 있도록 구성되어 있다.



그림 3.3.6 연구실에서 제작한 double Langmuir probe [49]



그림 3.3.7 Double Langmuir probe 의 feed through

Double Langmuir probe 와 feed through 를 연결하고 M-ICP 이온 빔 식각 장치에 설치를 한 실제 모습은 그림 3.3.8 과 같다. Discharge chamber 에서 플라즈마가 발생되기 때문에 그리드 위쪽의 측정 port 를 통하여 설치하였다. 측정 위치는 screen grid 의 가운데 위치에서 위쪽으로 3cm 지점 떨어진 곳에서 측정하였다. Probe 와 screen grid 와 사이는 최대한 가깝게 위치시키되, 이온 빔 식각 장치는 screen grid 에 positive voltage 가 인가되기 때문에 이로 인해 probe 에 간섭현상이 생길 수도 있어 걱정하게 위치를 떨어뜨려 놓았다.

플라즈마 밀도 및 전자온도 측정은 discharge chamber 기준으로 0.4 mTorr 에서 진행되었다. 2.2.1 절에서 이온 빔 식각 장치의 원리를 설명한 바와 같이 압력은 ion 의 mean free path 를 고려하여 낮게 실험조건을 잡아야 식각이 원활하게 이뤄지게 된다. Propagation chamber 의 압력이 낮아지면 자연스럽게 discharge chamber 의 압력도 낮아지게 되고 이온의 mean free path 와 높은 플라즈마 밀도를 생성하기 위한 조건 모두를 고려하였을 경우, discharge chamber 에서 압력은 약 0.4mTorr 였다. 방전 가스는 Ar 가스만을 사용하였으며 3.5 sccm 의 total flow rate을 유지하였다. RF Source power (27.12MHz) 는 500W<sub>s</sub> 를 인가하였다.

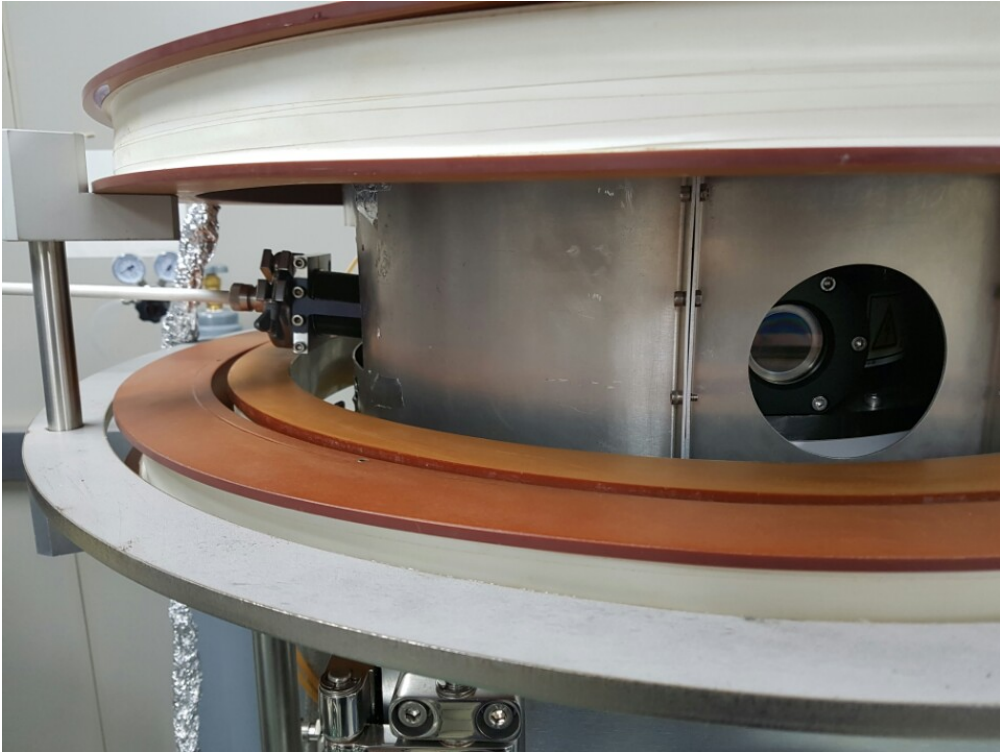


그림 3.3.8 Discharge chamber 옆면에 DLP 가 설치된 모습

자기장은  $0\text{ G} \sim 23\text{ G}$  까지 가변을 시키면서 플라즈마 밀도와 전자온도를 측정한 결과를 그림 3.3.9 와 같이 그래프로 정리하였다. 우선 플라즈마 밀도를 살펴보도록 하자. 플라즈마 밀도는 자기장의 크기가  $16\text{ G}$  까지 커짐에 따라 지속적으로 증가하다가  $16\text{ G}$  를 넘어서게 되면 감소하기 시작한다. 주목할 부분은  $9.5\text{ G}$  와  $12.5\text{ G}$  로 증가할 때 플라즈마 밀도의 증가폭이 상당히 크다는 것이다. 이는 M-ICP source 의 고유특징인 heating mechanism 에서 이유를 찾을 수 있다. R-wave heating 이 이뤄지기 위해서는 인가하는 주파수와 자기장의 크기의 상관관계가 중요하다. 본 연구에 사용된 RF power 주파수는  $27.12\text{ MHz}$  인데, 이 경우에는 자기장의 크기가  $9.69\text{ G}$  이상이 되어야 R-wave heating 이 원활하게 되면서 효율이 극대화된다. 즉, 플라즈마 밀도가 큰 폭으로 증가하는 부분은 R-wave heating 이 되는 지점으로 생각할 수 있다.  $9.69\text{ G}$  이하의 부분에

서는 자기장의 역할은 R-wave heating 보다는 confinement 의 역할을 하게 된다. 이는 플라즈마를 가둬두는 역할을 의미하며, 이로 인해 결과적으로 플라즈마 밀도를 증가시키는 영향을 미치게 된다. 자기장이 증가되면 confinement 뿐만 아니라 R-wave heating 효과도 일어나게 되어 플라즈마 밀도는 큰 폭으로 증가하게 되는 것이다.

자기장의 크기가 16 G 보다 큰 경우에 플라즈마 밀도가 감소하는 이유는 본 실험에 사용된 discharge chamber 수직방향 길이와 관련시켜 생각해 볼 수 있다. 정확히 말하면 RF window 와 screen grid 사이의 거리와 R-wave 파장과의 상관관계이다. M-ICP source 는 R-wave 에 의하여 heating 되는 시스템으로써 RF window 로부터 수직방향인 아래로 내려오게 되고, 수직축의 chamber 의 길이보다 R-wave 의 한 파장이 짧아야 한다[47]. 그림 3.3.10 에서 보는 것과 같이 자기장이 증가함에 따라 R-wave 파장의 길이도 역시 증가하는 것을 알 수 있는데 지속적으로 파장이 증가하다가 일정 영역, 즉 수직축 방향의 챔버 길이

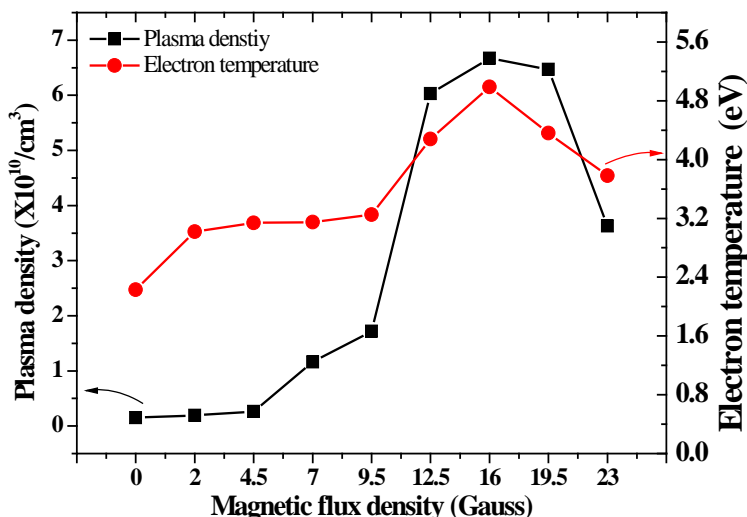


그림 3.3.9 자기장 변화에 따른 플라즈마 밀도와 전자온도

보다 파장이 길어지게 되면 축방향 모드가 생성되지 않아 R-wave heating 이 원활하지 않게 됨을 알 수 있다.

전자온도의 경우에도 대체적인 경향성 자체는 플라스마 밀도와 크게 다르지 않다. 0 G 부터 16 G 까지 자기장기 커짐에 따라 전자온도 역시 증가하다가 플라스마 밀도와 마찬가지로 16 G 보다 자기장이 증가하게 되면 전자온도 역시 소폭으로 감소하게 된다. 이는 앞서 플라스마 밀도의 변화를 설명하였던 맥락과 궤를 같이 한다고 볼 수 있는 부분이다.

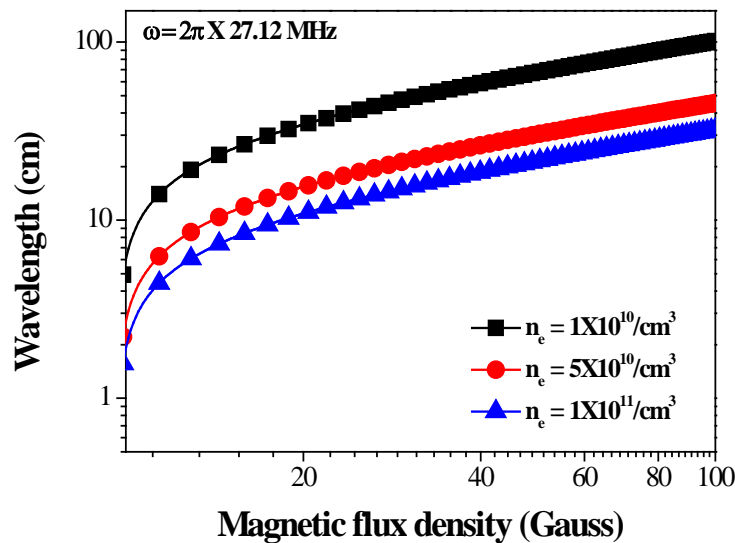


그림 3.3.10 자기장 크기에 따른 R-wave 파장 길이[86]

### 3.3.4 자기장 세기에 따른 ion beam flux 특성

모든 식각 장비에서 가장 중요한 스펙으로 보는 부분 중 하나가 식각 performance 이다. 이온 빔 식각 장치에서는 식각 mechanism 이 ion beam 에 의한 physical 한 sputter 식각이 이뤄지기 때문에 ion beam flux 의 특성을 보는 것이 매우 중요하다. 3.3.3 절에서 확인한 플라즈마 특성을 살펴보는 것도 중요한 부분이지만 본 절에서 살펴볼 ion beam flux 특성이 식각과 직접적인 연관이 되어 있는 핵심적인 특성이라고 할 수 있다.

Ion beam flux 특성을 측정하는 위치는 플라즈마 밀도와 전자온도를 측정하는 위치와는 상이하다. 플라즈마 밀도와 전자온도를 측정하는 측정 tool 은 double Langmuir probe 로써 discharge chamber 에서 측정실험을 진행하였지만 ion beam flux 는 ion energy analyzer 로 측정하게 되며 propagation chamber 에서 측정하게 된다. Substrate 바로 위에 ion energy analyzer 를 놓고 그리드를 통해 내려오는 ion beam 의 에너지 영역과 total flux 양을 측정한다.

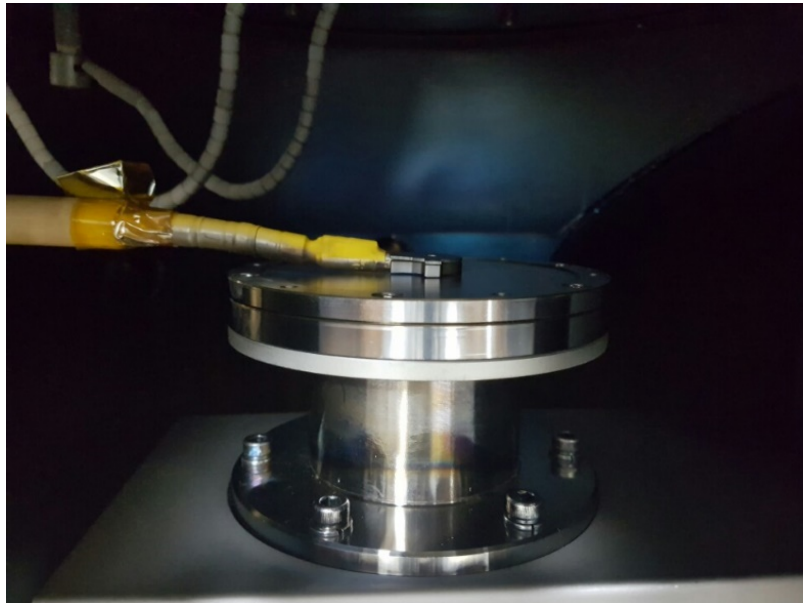


그림 3.3.11 Substrate 에 놓여진 ion energy analyzer



그림 3.3.11 은 Substrate 에 놓여진 ion energy analyzer 의 모습이다. 측정하기 위해서는 double Langmuir probe 와 마찬가지로 feed through 가 필요한데 DLP 측정실험과 동일한 것을 사용하고 있다.

실험을 진행한 압력 조건은 propagation chamber 기준으로 0.2 mTorr 이다. 플라스마 밀도와 전자온도를 측정하는 실험과는 다르게 ion flux 를 측정할 때에는 propagation chamber 에서 측정실험을 하였으므로 ion energy analyzer 를 이용한 실험의 경우에는 propagation chamber 의 압력에 기준을 맞추고 실험을 진행하였다. Gas 를 주입하는 부분이 discharge chamber 에 있고 TMP 가 propagation chamber 아래쪽에 있기 때문에 가운데에 있는 그리드를 중심으로 위아래 압력에 차이가 존재한다. 그리드 아래인 propagation chamber 의 압력이 그리드 위쪽인 discharge chamber 의 압력의  $1/2$  정도로 낮게 측정이 되었다. 바꿔 말하면 플라스마 밀도와 전자온도를 측정하는 실험을 진행하였던 압력 (discharge chamber 기준으로 0.4 mTorr) 과 ion flux 측정실험을 진행한 압력은 측정한 위치가 다르기 때문에 다르게 표현된 것일 뿐, 실제로는 같은 압력 조건이라고 할 수 있겠다. RF source power (27.12MHz) 는 500 W<sub>s</sub> 를 인가하였으며 screen grid 는 positive 300V, accelerator grid 는 negative 600V 를 인가하였다.

그림 3.3.12 는 0 G ~ 23 G 자기장 가변에 따른 ion energy distribution function 이다. 특이한 점은 각각의 자기장 조건 모두 동일하게 300 eV 에서 peak 가 형성되어 있는데 이는 screen grid voltage 를 positive 300V 모두 동일하게 인가했기 때문이다. Screen grid 와 accelerator grid 전압 인가에 따른 특성에 관한 설명은 3.5.3절과 3.5.4절에서 자세히 다루도록 하겠다. 에너지의 분포는 모두 동일한 위치에서 생기지만 peak 의 면적, 즉 ion flux 는 모두 상이함을 확인 할 수 있다. 그림 3.3.13 은 자기장 가변에 따른 ion flux 를 나타낸 그래프 이고 3.3.12 에서 얻은 ion energy distribution function 를 적분하여 얻을 수 있다.

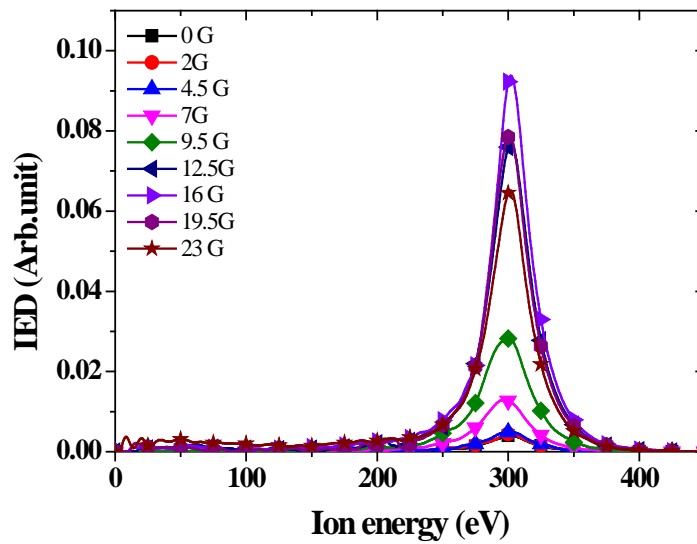


그림 3.3.12 자기장 가변에 따른 ion energy distribution function

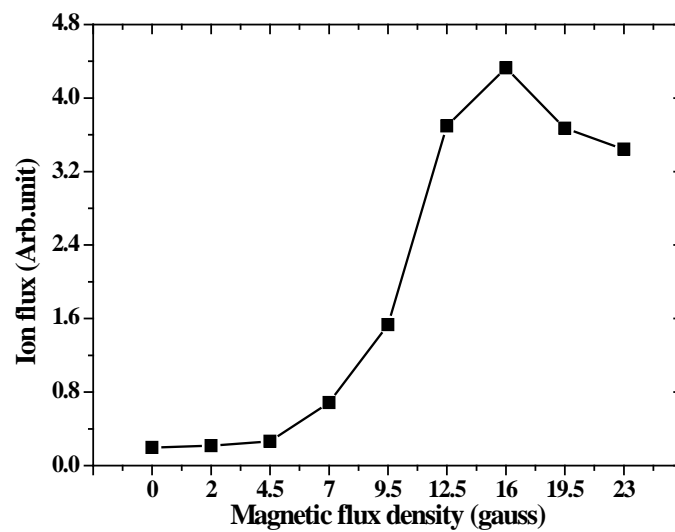


그림 3.3.13 자기장 가변에 따른 ion flux 변화

자기장의 크기가 16 G 까지 증가함에 따라 ion flux 또한 지속적으로 증가하게 되며 16 G 보다 더 큰 자기장의 조건에서는 ion flux 가 감소하게 된다. 이와 같이 ion flux 가 자기장에 따라 변화하는 이유는 3.3.3 절에서 살펴본 플라즈마 밀도와 전자온도 변화에 따른 이유로 생각 할 수 있다. Ion source 에서 실행 연구된 논문에 의하면 ion beam current 는 식 3.3.10 과 같이 표현된다[57].

$$I_p = AJ_p = 23.12 \times 10^{-13} n_i \left( \frac{T_e}{m_i} \right)^{\frac{1}{2}} \times \left[ 1 + \frac{1}{\tan^2 \theta} (1 - \sqrt{1 + \tan^2 \theta}) \right] \quad (3.3.10)$$

분자 term 에 플라즈마 밀도와 전자온도가 있기 때문에 DLP 에서 측정했던 결과가 ion flux 에도 그대로 영향을 미치는 것이라고 생각할 수 있다. 측정된 ion flux 의 결과와 그리드에 연결되어 있는 power supply 에서 display 되는 전류를 그림 3.3.14 에 그래프로 나타내었다. 그리드 전류란 screen grid 와 accelerator grid 에 흐르는 전류를 각각 의미하며 screen grid 에 흐르는 전류는

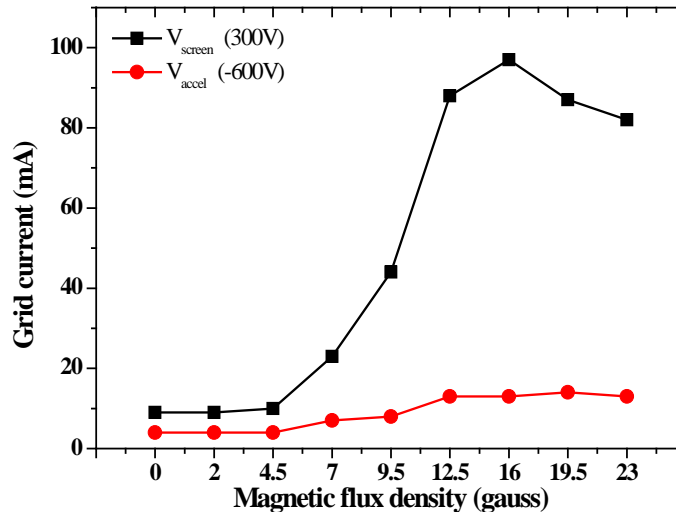


그림 3.3.14 자기장 가변에 따른 그리드에 흐르는 전류 변화

실제 ion beam current 와 비례하는 특성이 있어서 “beam current” 라고 통상적으로 부르고 있다. 반면에, accelerator grid 에 흐르는 전류는 screen grid 를 통과한 ion 들이 충돌하지 않고 구멍을 그대로 통과해서 substrate 로 입사해야 하는데 일부는 accelerator grid 에 충돌하기 때문에 생기는 전류, 즉 이 전류를 “loss current” 라고 부른다. Screen grid 와 accelerator grid 에 흐르는 전류만으로도 대략적인 ion flux 의 경향성을 확인할 수 있는 것이다. Screen grid 에 흐르는 전류는 많을수록, accelerator grid 에 흐르는 전류는 적을수록 ion flux 는 높을 것이라는 것을 예상할 수 있다. 이러한 경향성은 ion energy analyzer 로 측정된 ion flux 의 결과를 뒷받침해주는 중요한 근거가 되고 측정된 결과가 올바른 값인지 검증해주는 역할을 하게 된다.

3.3.3 절과 3.3.4절에서는 플라즈마 특성이 ion flux 와는 어떤 상관관계가 있는지 살펴보았다. 플라즈마 밀도와 전자온도 특성이 beam current 에 그대로 반영되는 중요한 특성이 존재함으로써 discharge chamber 에서의 플라즈마 방전특성에 대한 연구의 중요성을 알 수 있었다. 다음 절에서는 RF source power 변화에 따른 플라즈마 방전 특성과 이에 따라 ion beam flux 는 어떤 특성변화가 생기는지 살펴보도록 하겠다.

## 3.4 RF power 가변에 따른 방전 및 ion beam flux 특성

### 3.4.1 RF power 가변에 따른 방전 특성

본 절에서는 RF source power 가변에 따른 방전 특성의 변화를 살펴보고자 하겠다. 통상적인 일반적인 플라즈마 식각 장치의 경우에는 RF power 가 Source 뿐만 아니라 substrate 에도 인가가 되어 구분해서 RF power 를 사용하지만 본 실험에 사용된 이온 빔 식각 장치에는 source power 만 존재함으로 RF power 라고 통칭 하도록 하겠다.

Double Langmuir probe 가 사용 되었으며 위치는 동일하게 discharge chamber 에서 측정하였다. 측정되는 위치는 3.3.3 절에 언급한 부분과 동일한 위치 (screen grid 가운데 위치에서 위로 약 3cm 떨어진 지점) 이다.

실험때 사용된 압력조건은 discharge chamber 기준으로 0.4 mTorr 이며 자기장의 조건은 3.3.3 절에서 사용된 자기장 가변 조건 중에서 가장 ion beam flux 가 높게 측정된 16 G 이다. RF power 주파수는 27.12MHz 이다.

그림 3.4.1 은 RF power 가변에 따른 플라즈마 밀도와 전자온도의 측정결과이다. RF power 는 200 W 에서 800 W 증가시킬수록 플라즈마 밀도는 지속적으로 증가하였으며 전자온도는 RF power 조건이 500 W 까지는 증가하다가 더 파워를 높이게 되면 미세하게 감소하거나 비슷한 전자온도 값을 유지하였다. RF power 가 증가함에 따라 플라즈마 밀도가 증가하는 것은 누구나 이해할 수 있을만한 결과이지만 전자온도가 RF power 의 변화에 따라 변하는 것은 일반적이지 않을 결과라고 할 수 있다. 일반적으로 알려진 결과에 의하면 전자온도는 RF power 에는 independent 하고 gas pressure 조건에 dependent 한 경향을 가지고 있다.

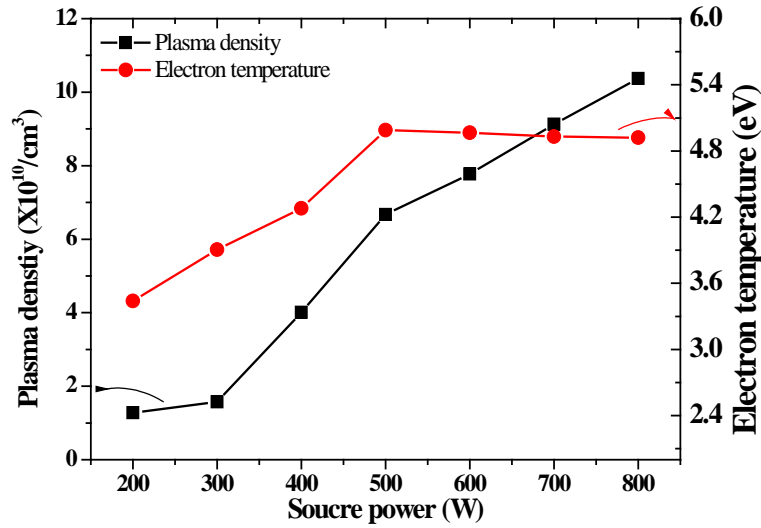


그림 3.4.1 소스파워 가변에 따른 플라즈마 밀도 및 전자온도

그러나, Source 가 ECR plasma 조건에서 특수한 조건이 만족되면 소스파워가 증가함에 따라 전자온도도 증가하는 현상이 발생한다고 선행연구가 진행된 바 있다[87]. Magnetic field 의 configuration 에 따라 RF power 에 따라 전자온도가 dependent 한 경향도 보일수 있으며, 일반적으로 알려진대로 independent 한 경향도 보일 수 있다고 발표 되었으며 그 논문에 관한 실험 결과를 간단하게 살펴보면 그림 3.4.2 와 같다. 이처럼 MICP source 에서는 자기장의 configuration 에 따라 소스파워에 따른 전자온도 특성을 다양하게 살펴볼 수 있는 여지가 있으며 이를 잘 응용하면 유저가 원하고자 하는 플라즈마 특성을 얻는데 유용 하리라 생각된다.

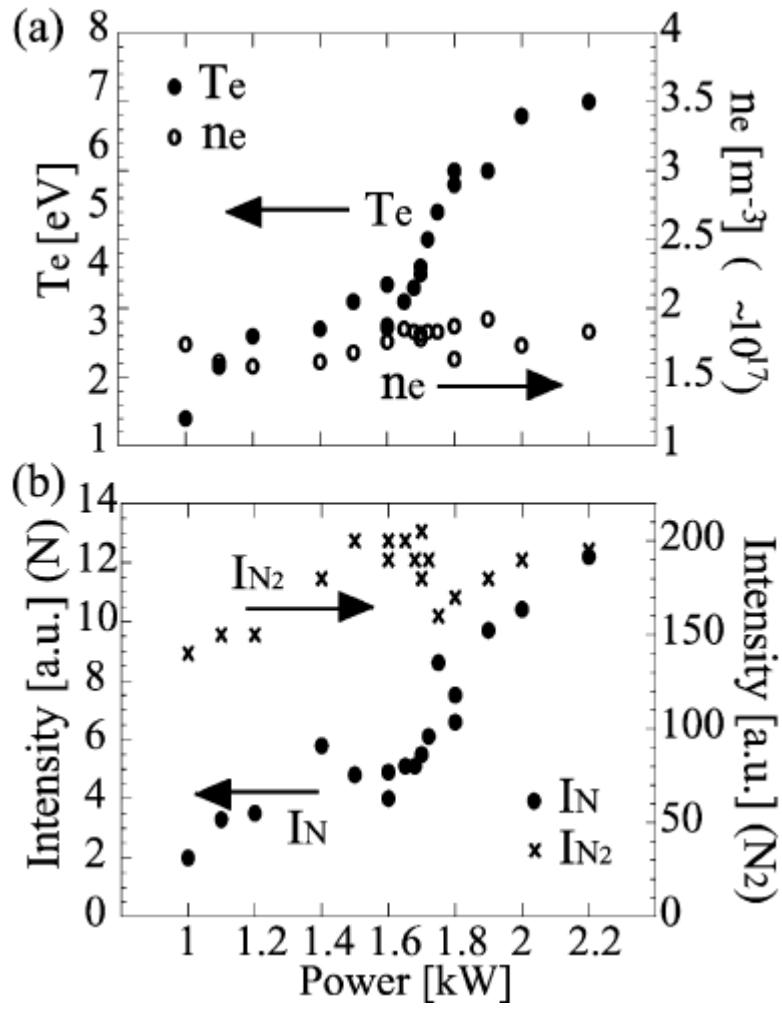


그림 3.4.2 (a)파워 가변에 따른 플라즈마 밀도와 전자온도 [87]

(b) 파워 가변에 따른  $I_N$  과  $I_{N_2}$  측정 결과 [87]

### 3.4.2 RF power 가변에 따른 ion beam flux 특성

본 절에서는 RF power 가변에 따라 ion beam flux 의 특성은 어떻게 변화하는 지 살펴보도록 하겠다. Ion beam flux 측정에서는 앞 절에서 언급한 연구실에서 자체 제작한 ion energy analyzer 를 사용하였으며 propagation chamber 의 substrate 위쪽에 측정 tool 을 설치하였다.

실험에 사용된 압력조건은 propagation chamber 기준으로 0.2 mTorr 를 사용하였으며 자기장은 16 G, RF power 의 주파수는 27.12MHz 를 사용하였다. Screen grid 의 전압은 positive 300V, accelerator grid 전압은 negative 600V 를 인가하였다.

그림 3.4.3 은 200 W 부터 800 W 까지 RF power 가변에 따른 ion energy distribution function 이다. Screen grid 의 전압이 모든 조건이 동일하기 때문에 측정된 ion energy distribution function 의 peak 또한 같은 위치 (300eV) 에서 측정이 되었다. Peak 의 높이로 보면, 200 W 에서 500 W 까지 RF power 가 증가하는 구간에서는 점점 peak 가 높아지다가 500 W 지점에서 maximum 이고 RF

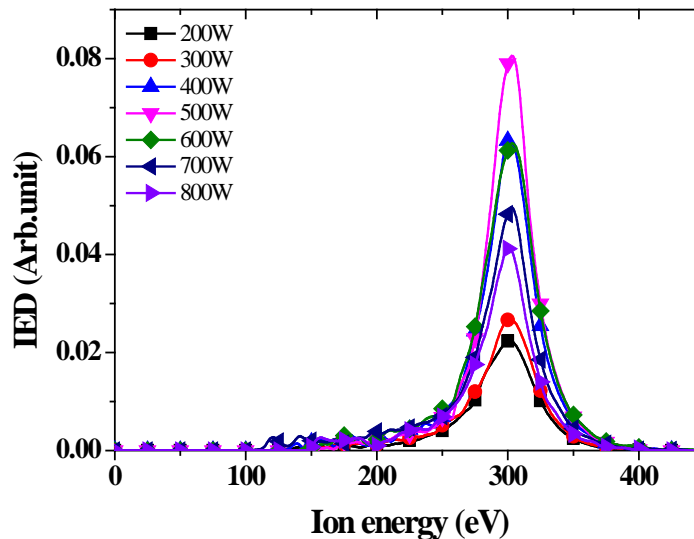


그림 3.4.3 RF power 변화에 따른 ion energy distribution function



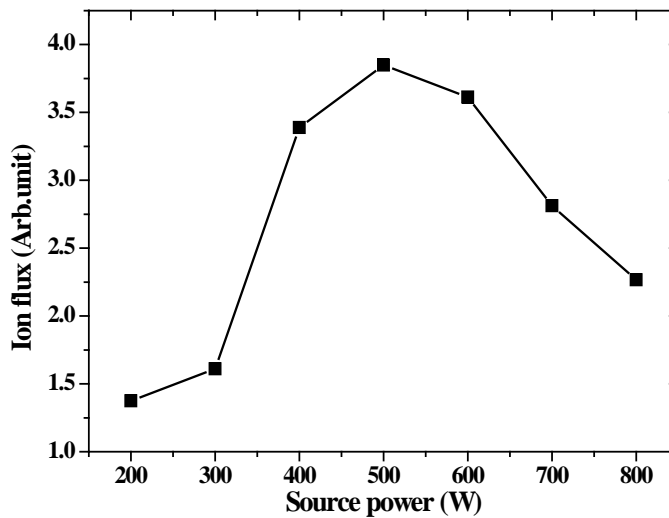


그림 3.4.4 RF power 변화에 따른 ion flux 측정결과

power 가 더 증가하게 되면 peak 또한 줄어드는 경향을 보이고 있다.

그림 3.4.3 에서 측정된 그래프를 적분하여 ion flux 로 나타내어 보면 그림 3.4.4 와 같이 나타낼 수 있다. RF power 가 500 W 일때 ion flux 가 maximum 인 모습을 확인 할 수 있다. 특이 사항으로는 3.4.1 절에서 살펴본 바로는 RF power 가 증가함에 따라 지속적으로 플라스마 밀도는 증가하는 경향을 보이고 있는 부분이다. 플라스마 밀도와 전자온도는 ion beam flux 와는 비례하는 관계라고 설명한 부분과 모순되는 부분이 발생하게 된다. 그림 3.4.4 에서 나타난 현상은 이온 빔 식각 장치의 grid 에서 발생하는 고유한 현상으로 해석을 해야 이해할 수 있는 부분이다. 이온 빔 식각 장치의 grid 에는 수많은 구멍이 있고 grid 구멍에서 discharge chamber 쪽으로 그림 3.4.5 의 첫번째와 같은 볼록한 형태로 sheath 가 형성된다. 하지만 플라스마 밀도의 증가에 따라 sheath 는 점차 구멍 아래쪽으로 내려오는 형태가 되고 지나치게 플라스마 밀도가 높아지게 되면 세번째 그림과 같은 오목한 형태로 구멍 아래로 sheath 가 내려오게

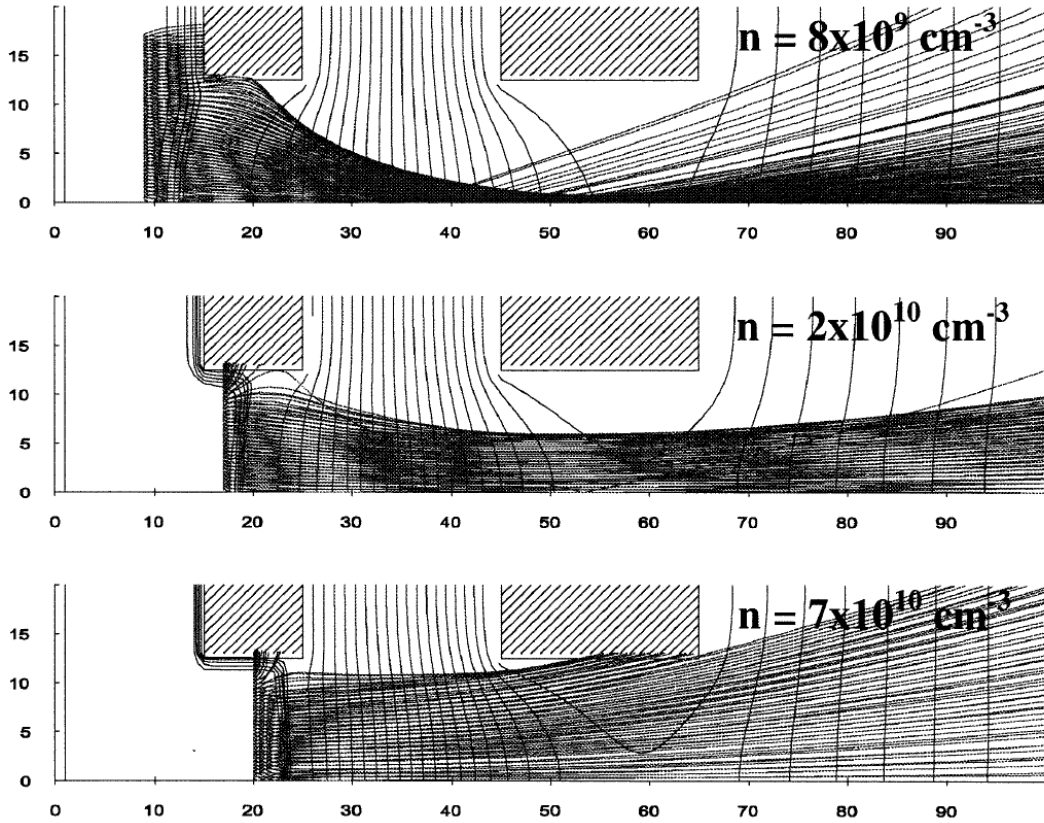


그림 3.4.5 플라즈마 밀도 증가에 따른 sheath 와 ion beam 궤적변화[88]

된다[88]. 이와 같은 형태가 되면 ion 들의 궤적이 한곳에 converge 한 형태가 아니라 divergence 하게 되어 beam focus 에 심각한 문제가 발생하게 되고 이는 식각 효율의 저하를 가져오게 된다.

플라즈마 밀도가 지나치게 증가하면 screen grid 를 통과하는 ion 들의 궤적 변화로 인해 ion flux 가 감소하는 현상을 screen grid 와 accelerator grid 에 흐르는 전류를 통하여 확인할 수 있다. 그림 3.4.5 의 세 번째 그림에서 보는 바와 같이 ion 궤적에 변화가 생기면 accelerator grid 에 ion 들이 많이 충돌하게 되어 loss 가 생기게 된다. 이렇게 충돌하게 되면 이는 accelerator grid 에 연결된 power supply 에 전류로 detection 이 되며 이를 그림 3.4.6에 나타내었다.

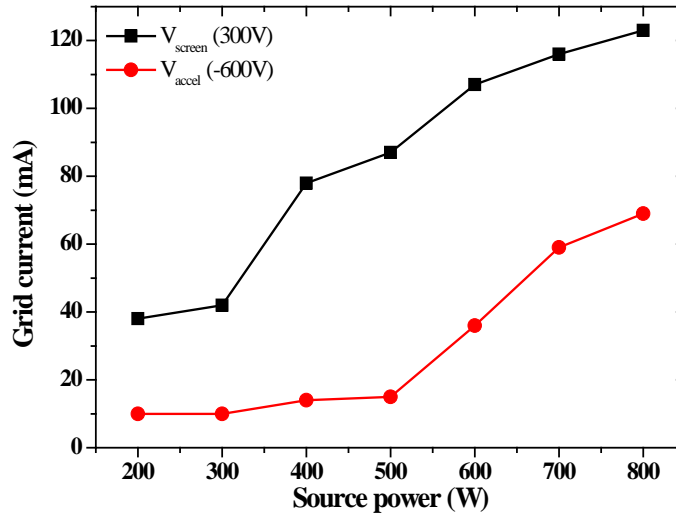


그림 3.4.6 RF power 가변에 따른 그리드 전류 변화

Screen grid 전류는 RF power 가 증가함에 따라 지속적으로 증가하는 경향을 보이고 있다. 이는 RF power 증가에 따른 플라즈마 밀도 증가와 관련 지어 생각할 수 있으며 이해가 쉽게 되는 부분이다. 반면에, accelerator grid 전류는 RF power 가 200 W 에서 500 W 까지 증가하는 구간에서는 거의 비슷하게 유지가 되고 있으나 600 W 부터는 급격하게 증가하는 경향을 보이고 있다.

이와 같이 accelerator grid 전류가 급격하게 증가하는 현상은 screen grid 를 통과한 ion 들이 accelerator grid 에 collision 되어 나타나는 현상의 중요한 근거로 판단 할 수 있으며 이 현상은 이온 빔 식각 장치의 loss current 인 셈이다. Accelerator current 가 증가하는 현상은 이온 빔 식각 장치의 performance 측면에서 상당히 불리한 점으로 작용하며 etch rate 에 직접적으로 좋지 않은 영향을 미치게 된다.

실험 결과에 따르면 효율적인 이온 빔 식각 장치의 조건은 높은 플라즈마 밀도를 형성하도록 하되 grid 와 상관관계를 고려하여 효율적으로 설계를 해

야만 한다. Ion beam 이 적절하게 converge 하게 되는 조건을 찾아야 높은 ion beam flux 를 기대할 수 있으며 결과적으로 높은 etch rate 을 얻을 수 있게 된다.

적절한 플라즈마 조건이 중요한데 이것은 무엇에 영향을 받으며 screen grid 의 구멍과 sheath 와의 관계, 또한 screen grid 와 accelerator grid 에 인가한 전압에 따른 sheath 는 어떻게 변화하며 ion beam focus 측면에는 어떤 영향을 미치게 되는지 다음 절에서 자세히 살펴보도록 하겠다.

## 3.5 IBE 그리드의 sheath 형성과 ion beam flux 의 상관관계

### 3.5.1 그리드의 sheath 형성 원리 및 이론

앞 절에서 screen grid 에서 생기는 sheath 의 형태에 따라 ion beam flux 의 증감에 대하여 살펴보았다. 그렇다면 플라스마 sheath 는 어떤 원리로 screen grid 에서 생기며 형태는 어떤 변수에 영향을 받아 sheath 의 형태가 변하게 되는지 본 절에서 자세히 살펴보도록 하겠다.

Sheath 란 플라스마와 접촉하는 표면에 생기는 양전하 공간을 지칭한다. 플라스마와 접촉하는 공간에 이와 같은 현상이 생기는 근본적인 이유는 플라스마 내에 있는 ion 과 electron 의 mobility 차이에서 기인한다. Electron 이 표면에 먼저 도달하여 표면 근처 플라스마는 양전하를 띠게 된다. 이렇게 생긴 전위는 표면으로 빠져나가는 전자를 감속시키고 이온을 가속화 시키면서 전체 전류가 0 이 되게 한다. 그 결과 플라스마 표면은 플라스마에 대해 음전위를 가지게 된다. 즉 다시 말하면 bulk 플라스마의 potential 은 플라스마의 접촉면에 대해 항상 positive potential 을 가지게 된다. 이 때 플라스마와 접촉하는 표면에 생기는 sheath 두께  $S$  는 식 3.5.1 과 표현이 가능하다[15].  $\lambda_{Ds}$  는 Debye length 를 의미하며  $V_0$  는 쉬스 양단에 걸리는 전압을 의미한다. 수식에서 보면 알 수 있듯이 플라스마 밀도, 온도, 양단에 걸리는 전압에 의해 두께변화가 생긴다.

$$S = \frac{\sqrt{2}}{3} \lambda_{Ds} \left( \frac{2V_0}{T_e} \right)^{\frac{3}{4}} \quad (3.5.1)$$

$$\lambda_{Ds} = \left( \frac{\epsilon_0 k T_e}{n_e e^2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3.5.2)$$

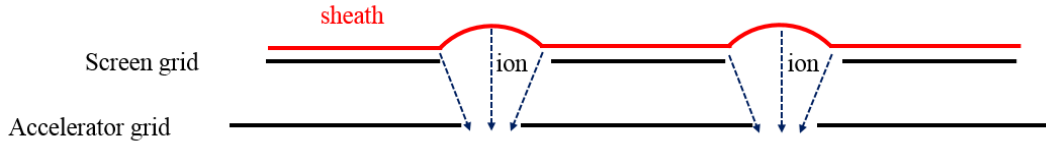


그림 3.5.1 그리드에서 sheath 형성 모습

일정 두께를 가진 sheath 는 그림 3.5.1 과 같은 형태로 screen grid 에 형성된다. 볼록 렌즈 같은 형태로 sheath 는 형성되며 적절하게 볼록하게 형성된 sheath 는 beam focus 의 향상을 가져오게 되어 이온 빔 식각 장치의 performance 를 높이는 역할을 하게 된다. 이 때, 적절한 볼록한 형태라는 조건이 상당히 중요하다고 볼 수 있는데 여기에 관여하는 geometric 변수들은 screen grid 와 accelerator grid 구멍의 지름, 두 그리드 사이의 거리, 두 그리드 각각의 두께, 그리드의 edge 쪽의 shape 등 다양하게 영향을 미치게 된다[54-56]. 또한 그리드 전압 인가 조건에 의해서도 영향을 받아 sheath 의 모양이 변하게 되는데 이에 대해 자세히 알아보도록 하자.

우선, 플라즈마가 바라보았을 때의 screen grid 와 accelerator grid 의 전위가 다르다는 점을 생각해 볼 수 있다. 수식 3.5.1 에서 보면 알 수 있듯이 sheath 두께는 bulk plasma 와 접촉면의 양단에 걸리는 전압에 의하여 두께가 결정되는데, 플라즈마가 negative voltage 이 걸린 accelerator grid 를 바라 보았을 경우에는 sheath 두께가 screen grid 에 생긴 sheath 두께보다 더 두꺼워 져야 한다는 것을 알 수 있다. 이는 screen grid 구멍 위에 있는 플라즈마는 accelerator grid 의 영향을 받아 더 두꺼워 져야 한다는 것을 의미하고 결과적으로 그림 3.5.1 과 같은 볼록한 형태로 sheath 가 형성된다.

Accelerator grid 에 동일한 negative voltage 가 인가가 되어있고, screen grid 에 다른 voltage 가 인가가 되는 경우를 생각해 보자. Screen grid 전압이 변하게 되면 bulk 플라즈마의 전위에도 역시 변화가 생긴다. 플라즈마 전위가 변한다는

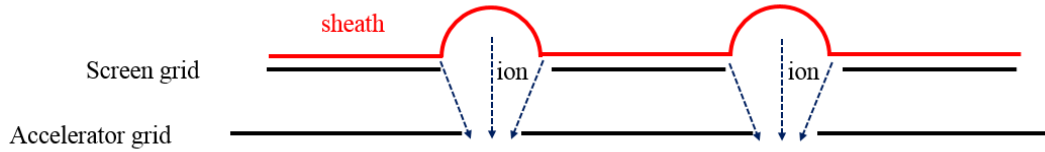


그림 3.5.2 두 그리드 사이의 전압 증가로 인한 sheath 의 형태 변화

것은 플라스마와 접촉면 사이의 양단의 전압에 변화가 생기는 것을 의미하게 되고 이는 sheath 두께에 영향을 미치게 된다. 그렇기 때문에 동일하게 negative voltage 가 인가가 되어 있더라도 screen grid 에 인가되는 positive voltage 값이 크게 되면 그림 3.5.2 와 같이 더 볼록한 sheath 형태를 가지게 된다.

이번에는 screen grid 에 동일한 positive voltage 가 인가가 되고 accelerator grid 에 다른 전압이 인가될 경우를 생각해보자. 플라스마 전위는 같은 경우라고 할 수 있겠지만 플라스마가 accelerator grid 를 바라볼 때의 전위가 각각 다르게 된다. 이는 결과적으로 더 낮은 negative voltage 가 인가되는 경우에는 그림 3.5.2 와 같이 더 볼록한 sheath 형성으로 이어지게 된다. 위의 두 가지 경우를 모두 살펴본 결과, 두 그리드 사이의 절대적인 전위 차이가 크면 클수록 sheath 의 모양은 더 볼록해진다는 것으로 이해할 수 있다.

이처럼 그리드에 걸리는 전압에 따라 sheath 모양과 두께가 변하게 되고 이로 인해 substrate 에서 측정되는 ion beam flux 에도 큰 영향을 미치게 된다. 그렇다면 그리드 전압을 가변 하였을 경우에는 ion beam flux 에 어떤 영향을 미치는지 다음절에서 자세히 살펴보도록 하겠다.

### 3.5.2 Screen grid 전압에 따른 ion beam flux 특성

그리드 전압에 따라 sheath 형태 및 두께의 변화에 대하여 살펴보았고, 이에 따른 ion beam flux 특성의 변화에 대하여 본 절에서 살펴보도록 하겠다. 우선 screen grid 전압이 가변하면 ion beam flux 특성에는 어떤 변화가 생기는지 알아보도록 하겠다.

RF source power (27.12MHz), 압력, 자기장과 accelerator grid 전압의 조건은 각각 500 W<sub>s</sub>, 0.2 mTorr (propagation chamber 기준), 16 G 와 negative 600 V 로 고정하였다. Screen grid 의 전압은 positive 200 V ~ 500 V 까지 가변 하였다.

그림 3.5.3 은 screen grid 전압 가변에 따른 substrate 에서 ion energy analyzer 로 측정한 ion energy distribution function 이다. Screen grid 전압이 증가함에 따라 ion energy distribution function 의 peak 도 오른쪽으로 이동하는 것을 볼 수 있다. 각각의 조건에서 peak 위치가 곧 인가한 screen grid 전압인 셈이다. Screen grid 에서 인가한 전압보다 약간 높은 에너지를 가지는 곳에서 peak 가 나타나기도 하지만 그리드를 통과할 때 ion 들이 에너지를 약간 잃게 되면 본 실험결과와 같이 인가한 전압과 거의 비슷하게 peak 가 나타나게 된다[88]. 에너지 peak 가 screen grid voltage 에 따라 이동함과 동시에 peak 높이도 지속적으로 높아지는 것을 확인할 수 있는데 ion flux 의 양을 측정해보면 그림 3.5.4 와 같다. Ion flux 또한 screen grid voltage 가 증가함에 따라 지속적으로 증가하고 있는데, 이 현상은 screen grid hole 에서의 sheath 형태가 바뀌어 beam focus 가 더 효율적으로 된 것으로 생각 할 수 있다. 볼록한 형태의 sheath 는 볼록렌즈와 같은 효과를 한다고 볼 수 있으며 ion 들이 잘 모이게 하는 조건이 있는 것이다. 이처럼 최적의 그리드 전압은 앞서 언급한 바와 같이 절대적인 수치가 있는 것이 아니라 grid 를 구성하는 geometric parameter 들과 연관되어 있기 때문에 시스템을 구성하는 이온 빔 식각 장치마다 상이하다고 할 수 있다. Sheath 형태가 변함에 따라 beam focus 에 영향을 미치는데 이에 따라 current loss를 살펴보기



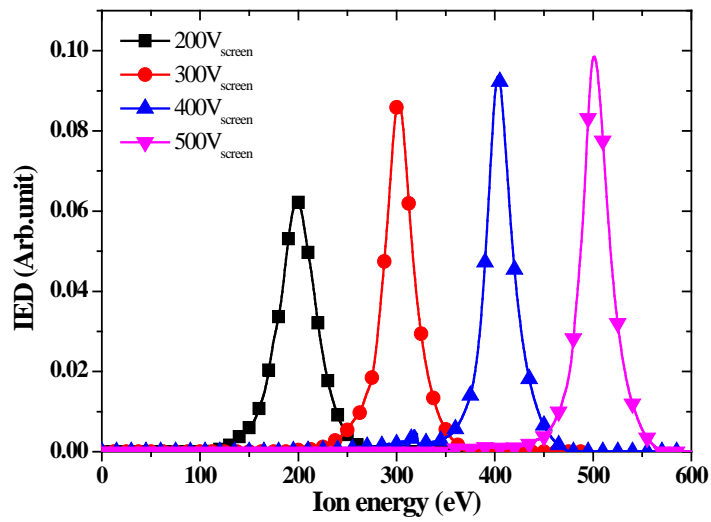


그림 3.5.3 Screen grid voltage 가변에 따른 IEDA 변화

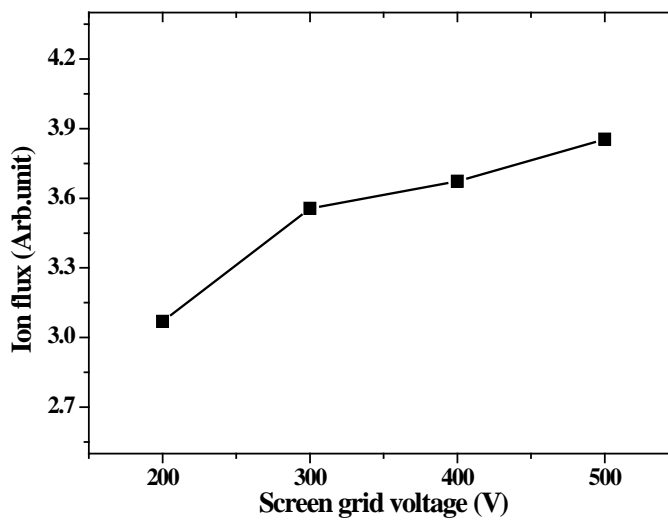


그림 3.5.4 Screen grid voltage 가변에 따른 ion flux 변화

위해 두 개의 그리드에 흐르는 전류를 살펴보았다. 그림 3.5.5 는 screen grid voltage 가변 할 때 흐르는 그리드 전류를 나타낸 것이다. Screen grid 전류는 지속적으로 증가하는 반면, accelerator grid 전류는 비슷한 값을 유지하고 있다. 이 전류의 양이 의미하는 것은 screen grid voltage 가 200V 인가가 되었을 경우에도 sheath 는 hole 에서 볼록하게 생겨 accelerator grid 에 ion 들이 충돌하여 생기는 current loss 가 거의 없었음을 의미한다. 즉, 앞 장에서 언급한 플라즈마 밀도 증가시에 생기는 오목한 sheath 형태로 인해 발생하는 current loss 는 없는 것이다. 다만, 이온 빔 식각 장치의 특성상 screen grid voltage 가 높아지면 좀더 많은 전류가 screen grid 에 흐르고 좀 더 효율적인 sheath 형태로 인해 ion flux 또한 증가하게 되는 것이다.

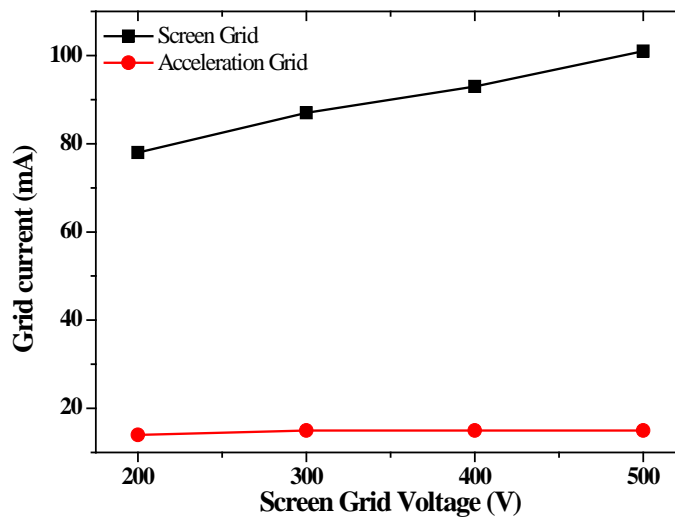


그림 3.5.5 Screen grid voltage 가변할 때 흐르는 그리드 전류

### 3.5.3 Accelerator grid 전압에 따른 ion beam flux 특성

두 개의 그리드중 negative voltage 를 인가하는 accelerator grid voltage 가변에 따른 ion beam flux 특성을 살펴보도록 하자. Screen grid voltage 가변실험을 할 때와 마찬가지로 RF source power, 압력과 자기장은 각각  $500\text{ W}_s$ ,  $0.2\text{ mTorr}$ ,  $16\text{ G}$  로 고정하였다. 이번 실험에서는 screen grid voltage 는 positive  $300\text{ V}$  를 인가하였으며 accelerator grid voltage 는 negative  $100\text{ V} \sim 600\text{ V}$  까지 가변하였다.

그림 3.5.6 은 accelerator grid voltage 를 가변할 때 측정된 ion energy distribution function 이다. Screen grid voltage 를  $300\text{ V}$  고정하였기 때문에 모든 조건이 같은 곳에서 peak 가 생기는 것을 확인 할 수 있다. 다만 각각의 조건들마다 peak 높이가 다른데, accelerator grid voltage 절대값이 커질수록 peak 가 높아지는 것을 볼 수 있다. Ion energy distribution function 을 적분하여 ion flux 로 비교한 것이 그림 3.5.7 에 그래프로 나타나있다.

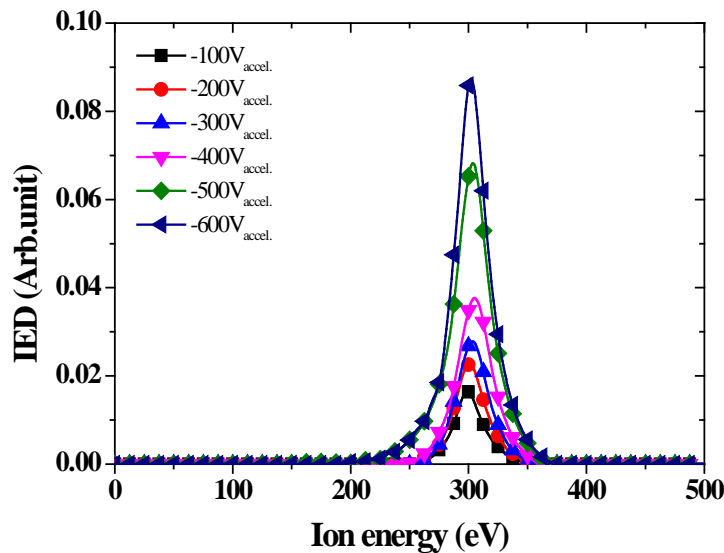


그림 3.5.6 Accelerator grid voltage 가변에 따른 IEDA 변화

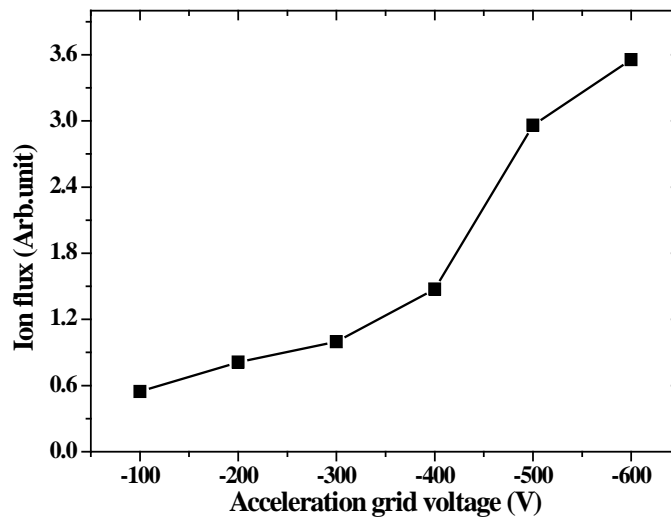
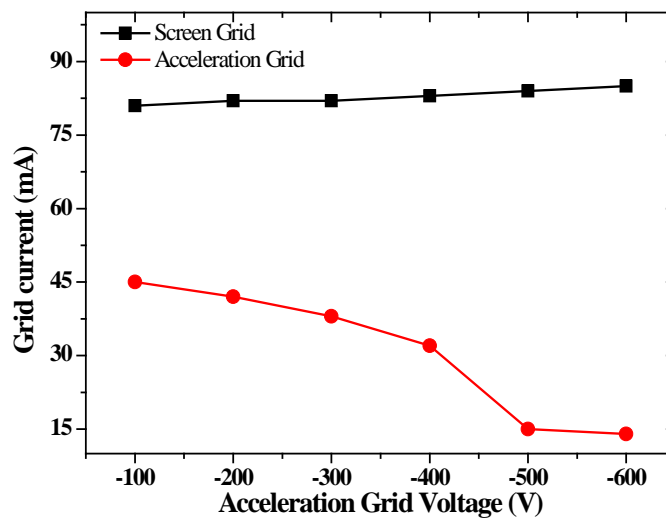


그림 3.5.7 Accelerator grid voltage 가변에 따른 ion flux 변화



(c)

그림 3.5.8 Accelerator grid voltage 가변에 따른 그리드 전류 변화

Accelerator grid voltage 의 절대값이 커질수록 ion flux 는 지속적으로 증가하게 되며 negative 400 V 와 500 V 구간에서는 특히 증가 폭이 크다. 특이한 점이 있다면 3.5.2 절에서 살펴본 screen grid voltage 가변에 따라 ion flux 가 증가하는 스케일보다 accelerator grid voltage 가변에 따른 ion flux 가 증가하는 스케일이 크다는 점이다. 이에 대하여 살펴보기 위해 그림 3.5.8 과 같이 그리드에 흐르는 전류를 살펴보았다. Screen grid voltage 는 이 실험에서는 300 V 로 고정하였기 때문에 모든 조건이 거의 비슷한 전류가 screen grid 에는 흐르는 것을 볼 수 있다. 반면에, accelerator grid 전류는 절대값 전압이 낮을 때는 높게 흐르다가 절대값 전압을 높여주면 전류가 감소하는 것을 확인 할 수 있다. 즉, 음의 값이 점점 커질수록 accelerator grid 에 흐르는 전류는 줄어들게 되며 negative 500 V 가 되면 큰 폭으로 줄어들게 된다. 그 이후에 전압의 절대값을 더 크게 올리더라도 전류는 비슷하였다. 전류값이 의미하는 것은 바로 ion 들이 accelerator grid 에 충돌하여 생기는 것으로써 loss current 이다. 다시 말하면, accelerator grid 절대값 전압이 낮으면 sheath 형태가 ion 들이 통과하기에 효율적으로 focus 해주지 못해서 손실이 발생하게 되고 효율적으로 beam focus 되는 전압값이 negative 500 V 인 것이다.

Discharge chamber 에서 발생시킨 플라즈마에서 loss current 없이 기판으로 입사시키기 위해서는 플라즈마 밀도와 전자온도의 control 뿐만 아니라 screen grid 와 accelerator grid voltage를 적절하게 조절해야 한다는 것을 확인 할 수 있었다. 이러한 ion beam flux 특성을 잘 이해해야만 장비의 performance 의 효율을 극대화 시킬 수 있을 것이다.

### 3.6 요약 및 향후과제

제 3 장에서는 본 연구에서 사용된 M-ICP 이온 빔 식각 장치의 구성 과정 및 다양한 가변 조건들에 따른 방전 및 ion beam flux 특성에 대하여 살펴보았다. 이온 빔 식각장치를 구성할 때 본 연구에서 가장 중요한 것은 자기장이라고 할 수 있는데, 다양한 자기장 조건을 알아보기 위하여 FEMM 시뮬레이션을 사용하였다. 이를 바탕으로 자기장 크기에 따른 전자석 전류 조건을 쉽게 모델링 할 수 있었으며 자기장의 구배 또한 M-ICP source 특성에 맞게 최적화 할 수 있었다.

M-ICP 이온 빔 식각 장치의 설계를 마친 후에는 screen grid 의 센터에서의 자기장의 크기를 기준으로 다양한 자기장의 크기에서의 플라즈마 방전 및 ion beam flux 특성에 대해 살펴보았다. 자기장의 크기가 증가함에 따라 플라즈마 밀도 및 전자온도를 증가하는 경향을 보이는데, 이러한 경향은 R-wave 파장이 discharge chamber 의 수직축 길이보다 짧을 때까지만 해당이 된다. M-ICP source 는 R-wave heating mechanism 을 가지고 있는데 R-wave 의 한 파장이 방전하는 chamber 의 수직축 길이보다 길게 되면 방전 효율이 떨어져서 플라즈마 밀도와 전자온도는 감소하게 된다. 이 때, ion beam flux 의 증감의 경향은 플라즈마 밀도와 전자온도의 경향과 같다.

자기장의 가변뿐만 아니라 RF power 와 screen grid 와 accelerator grid 전압의 가변에 따른 플라즈마 방전 및 ion beam flux 특성도 살펴보았다. 우선, RF power 가변에 따른 영향을 살펴보면, RF 파워 증가에 따라 플라즈마 밀도와 전자온도도 증가하는 경향성을 보이지만 substrate 에서 측정되는 ion beam flux 는 약간의 차이가 있다. 일반적으로 플라즈마 밀도와 전자온도가 증가하면 ion beam flux 역시도 증가를 해야 맞지만, 이온 빔 식각 장치에서 중요한 역할을 하는 그리드라는 변수가 있기 때문에 discharge chamber 에서 측정된 방전특성과 propagation chamber 에서 측정된 ion beam flux 는 항상 같은 경향성을 보이지

않는다. 지나치게 플라즈마 밀도가 높게 되면 screen grid 에서 생기는 sheath 의 형태가 그리드 구멍 아래쪽으로 오목하게 형성되어 ion 이 accelerator grid 에 충돌하는 양이 많아져 substrate 에서 측정되는 ion flux 양이 감소하게 된다. 한편, screen grid 및 accelerator grid 전압 가변시에 ion beam flux 에 미치는 영향도 살펴보았다. 두 개의 그리드 중에서 positive voltage 로 인가되는 것은 screen grid 인데 이것은 기관으로 입사되는 이온 에너지를 결정하는 역할을 하게 된다. Positive voltage 의 인가된 크기에 따라 ion energy 를 조절함으로써 식각 속도 control 이 가능하다고 할 수 있다. Accelerator grid 는 screen grid 를 통과한 ion 을 가속시켜주는 역할 뿐만 아니라 불룩한 sheath 모양을 변화시켜 좀더 ion beam focus 를 효율적으로 해주는 역할도 한다. Screen grid 와 accelerator grid 의 전위 차이에 의해 sheath 두께 및 형태를 조절함으로써 설계된 이온 빔 식각 장치의 performance 를 극대화 시킬 수 있다.

효율적인 M-ICP 이온 빔 식각 장치를 설계하기 위해서는 자기장의 공간분포와 적절한 크기, 최적화된 RF power 및 그리드 전압이 필수적으로 요구된다. 본 연구에서 최적화를 시킨 각각의 조건들은 고정된 값이 아니라 설계되는 이온 빔 식각 장치의 spec 에 따라 얼마든지 값이 변화할 수 있다. 이와 같은 변수들을 고려하여 이온 빔 식각 장치를 설계한다면 보다 더 성능을 극대화시킬 수 있을 것이다.

## 제 4 장 M-ICP 이온 빔 식각 장치의 균일도 특성

제 4 장에서는 M-ICP 이온 빔 식각 장치의 균일도 특성에 대해서 살펴보  
고자 한다. Discharge chamber 에서의 플라즈마 방전 특성에 관한 (플라즈마 밀  
도 및 전자온도) 균일도 뿐만 아니라 propagation chamber 에서의 ion flux 및 식  
각 균일도 특성에 대해서 살펴보도록 하겠다.

R-wave 전파와 플라즈마의 flute instability 특성을 고려하면 discharge chamber  
의 센터를 기준으로 반경방향과 수직축방향으로 증가할수록 자기장의 크기가  
증가해야 한다고 앞장에서 설명한 바 있다. 그렇다면, 전류 인가조건을 다르게  
하여 자기장의 다른 구배를 가지게 될 시에는 플라즈마 및 ion flux 특성의 어  
떻게 변화하는지 이번 장에서 살펴볼 것이며 추가적으로 균일도 특성도 살펴  
보겠다. 이에 나타난 균일도 특성을 실제 식각과 연관시켜봄으로써 application  
측면에서도 살펴보하고자 한다.

추가적으로 screen grid 와 accelerator grid 를 기존과는 다른 형태로 새롭게 제  
작하였다. 각각의 grid 의 센터를 기준으로 반경방향이 증가함에 따라 구멍의  
밀도를 다르게 할 경우 ion flux 및 식각 균일도에 대한 특성조사도 진행하였다.

식각 장비는 그 장비의 좋은 performance 에서는 균일도 특성이 매우 중요한  
요소로 인식되고 있다. 장비의 균일도 특성이 좋아야 수율이 그만큼 올라가고  
이로 인해, 좀 더 많은 수익을 기대할 수 있기 때문이다. 이와 같은 의미에서  
연구실에서 설계한 M-ICP 이온 빔 식각 장치의 균일도 개선에 관한 연구를  
진행함으로써 향후 반도체 식각 분야에서의 수율 향상에 도움이 되고자 한  
다.



## 4.1 자기장 구배와 균일도의 상관관계에 관한 선행 연구

플라즈마 식각 장치에서의 균일도 향상을 위한 연구는 지속적으로 진행되어 왔다. 자기장이 인가된 M-ICP 의 연구에 앞서 자기장이 없는 ICP 식각 장치에서도 연구가 진행되어져 왔는데 간단하게 살펴보고자 한다. 압력과 전력 조건에 따른 균일도 향상에 관한 연구[89-91]가 진행된 바 있고 장비의 높이에 따른 플라즈마 균일도 경향에 관한 연구[92]도 진행되었다. 파워를 인가하는 안테나에 변화를 준 연구도 진행된 바 있는데 ICP 안테나 안에 CCP 안테나를 위치시켜 이중 주파수를 인가하는 구조[93]와 pulse 전력을 인가하는 구조[94] 등이 시도되었다.

자기장이 인가된 ICP 형태인 M-ICP 식각 장치에서도 균일도 향상을 위한 연구가 진행되었다[39,50]. 특히 자기장 구배의 변화를 통해 큰 특성을 발견할 수 있었다. 연구된 논문에서는 기판 센터를 중심으로 반경방향으로 자기장이 감소하면 A-type, 증가하면 V-type 이라고 명칭하였다. 연구에 사용된 M-ICP 식각 장치는 300mm 웨이퍼가 사용이 가능하도록 substrate의 지름은 300mm 였기 때문에 반경방향으로는 150mm 까지 플라즈마 밀도 및 oxide etch rate을 측정하였으며 수식 4.1.1 을 이용[95]하여 non-uniformity 값을 측정하였다. 그래프로 정리하면 그림 4.1.1, 4.1.2 와 같다. 연구된 선행 논문에 따르면 M-ICP V-type 이 플라즈마 밀도와 식각의 균일도 특성이 가장 우수한 것으로 보고되었다[49]. 이러한 자기장의 구배에 따른 균일도 특성이 이온 빔 식각 장치에서는 보고된 바 없기 때문에 이에 대해 자세히 다루고자 한다.

*Non – uniformity (%)*

$$= \frac{(Maximum\ value - minimum\ value)/2}{Average\ value} \times 100 \quad (4.1.1)$$

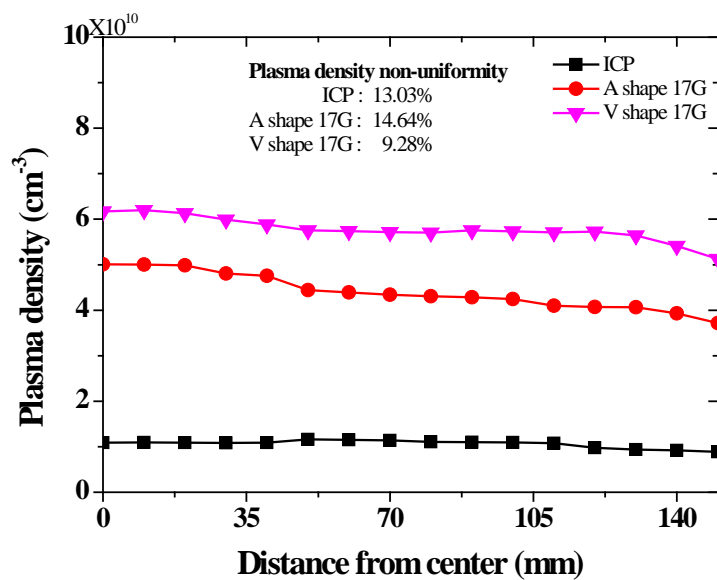


그림 4.1.1 ICP와 자장의 분포에 따른 밀도 분포 결과 [49]

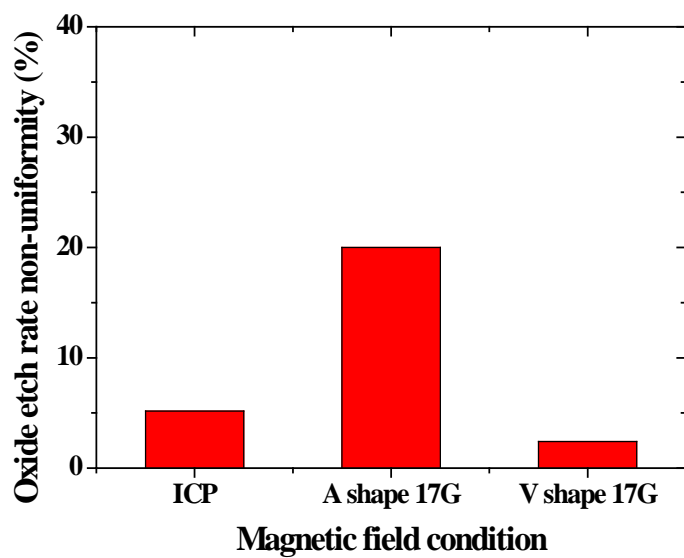


그림 4.1.2 ICP 및 M-ICP 조건에서 oxide 식각 속도의 non-uniformity [49]

## 4.2 전자석 전류 인가 조건에 따른 자기장의 공간 분포

3.2.2 절에서 살펴본 자기장 구현을 할 때 필요한 전자석은 Top 과 Bottom 전자석 두 개 만으로도 충분하였다. 하지만 다양한 자기장의 구배를 살펴보기 위해서는 두 개 만으로는 충분하지 않아서 그림 4.2.1 과 같이 bottom 전자석 안쪽에 추가로 전자석 하나를 더 설치하였으며 bottom 전자석이 두 개가 되었으므로 안쪽은 bottom inner 전자석, 바깥쪽은 bottom outer 전자석으로 명칭하기로 한다.

세 개의 전자석에 각각 전류를 표 4.2.1과 같이 흘려서 총 4가지 자기장 구배를 만들었다. 다른 자기장의 구배는 Case 1 ~ Case 4 까지로 지칭하여 본 논문에서는 사용하도록 하겠다. 총 4가지 경우 모두 스크린 그리드에서 RF window 까지 거리가 증가함에 따라 자기장의 크기는 증가하도록 하되 반경방향으로는 각각 다른 자기장 기울기를 가지도록 설계를 하였다. Case 1 ~ Case 4 의 모든 경우에서 수직축 방향으로 자기장이 증가하도록 설계한 이유는 R-wave 전파를 모든 경우에서 효율적으로 맞춰주기 위함이다. 이에 따라 R-wave 전파가 비효율적으로 되는 경우를 배제하고 반경방향에 따른 자기장의 기울기만 비교

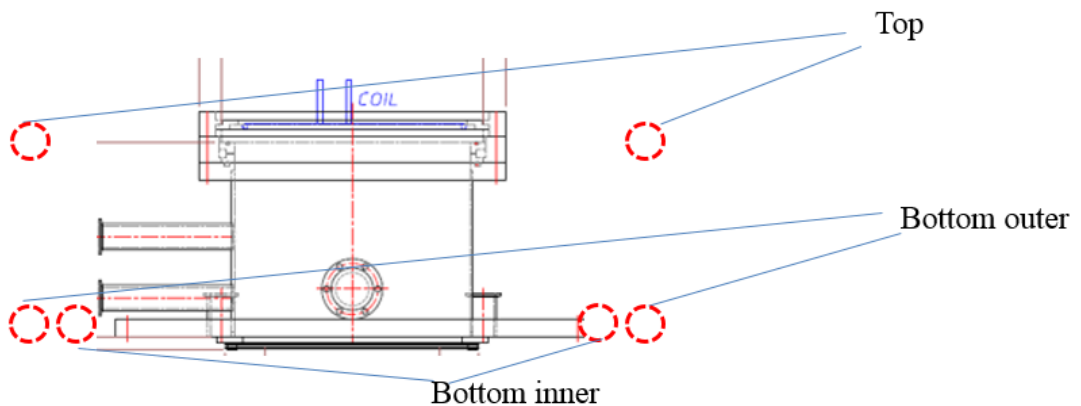


그림 4.2.1 세 개 전자석 설치 위치

	Top	Bottom inner	Bottom outer
Case 1	900 mA	0 mA	100 mA
Case 2	500 mA	0 mA	500 mA
Case 3	600 mA	610 mA	-300 mA
Case 4	400 mA	950 mA	-705 mA

표 4.2.1 자기장 구배에 따른 전자석에 흘리는 전류 인가 조건

함으로써 flute instability 특성, 즉 반경방향에 따른 균일도 특성에 대해 알아보  
고자 함이다.

Case 1 ~ Case 4 조건 모두다 스크린 그리드의 중앙에서의 magnetic flux density  
값은 13G로 일치시켰으며, 각각의 조건에 따라 반경방향과 수직축 방향으로  
gauss meter 로 실제 측정한 자기장 값이 그림 4.2.2 와 그림 4.2.3 에 그래프로  
나타나있다. Case 1은 스크린 그리드 중앙에서부터 가장자리로 갈수록, 즉 반경  
방향이 증가함에 따라 자기장이 소폭 감소하게 된다. Case 2 는 제 3장에서 자  
세히 살펴 본 바가 있는데 반경방향이 증가할수록 자기장의 스키는 소폭 증가  
하며, 스크린 그리드 중앙대비 외곽에서의 자기장의 크기 증가폭은 약 1 G 이  
다. Case 3 도 역시 반경방향이 증가할수록 자기장의 크기는 증가하지만 Case 2  
와 다른점은 중앙대비 외곽에서의 자기장의 크기 증가폭은 약 1.5 G 이다. Case  
4 또한, 반경방향이 증가함에 따라 자기장의 크기가 증가하도록 설계하였지만  
증가폭은 Case 3 보다 큰 2 G 이다.

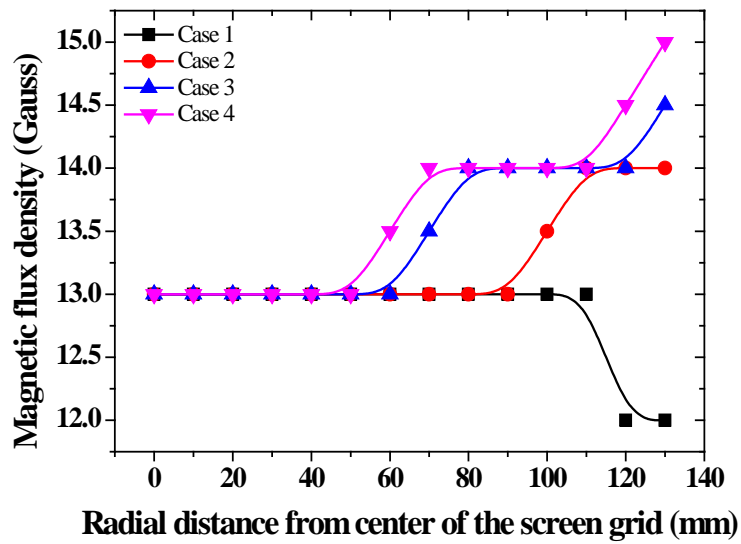


그림 4.2.2 반경 방향 위치에 따른 자기장 크기

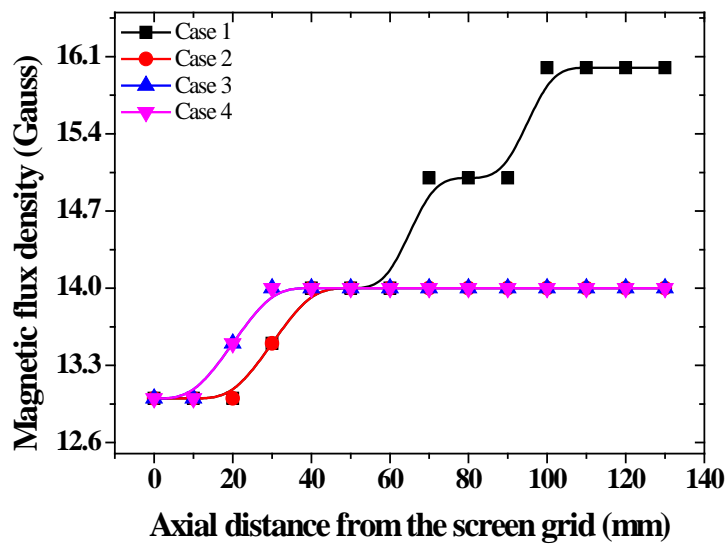


그림 4.2.3 수직축 방향 위치에 따른 자기장 크기

수직축 방향이 증가함에 따른 자기장의 크기는 Case 1 의 경우가 자기장 증가폭이 가장 크고 Case 1 을 제외한 Case 2 ~ Case 4 의 경우에는 비슷한 자기장의 크기가 증가함을 알 수 있다. 네 가지 모든 경우가 모두 수직축 방향이 증가함에 따라 자기장의 크기가 증가하여 R-wave heating 측면에서 효율적인 조건을 충족하게 된다.

Case 1 ~ Case 4 의 조건에 따른 자기장을 반경 방향 및 수직축 방향에 따라 gauss meter 기를 이용하여 직접 측정해 보았다. 전자석 전류 인가 조건을 다르게 가져감으로써 자기장의 다른 구배를 만들어 볼 수 있었다. 반경방향과 수직축 방향으로 증가할수록 자기장의 크기가 커지는 조건이 중요하다고 앞장에서 설명한 바 있다. 이에 따라 반경방향에 따른 자기장의 기울기 gradient 가 더 커지게 되면 플라즈마 및 ion beam flux 특성 변화에 대해 살펴보기 위해 위와 같은 조건들로 자기장 구배 설계를 하게 되었다. 다만, 반경방향이 증가함에 따라 더 큰 자기장의 증가폭을 가져가기 위해서는 전자석에 흘리는 전류량이 매우 커져야 하는데 전류를 인가하는 power supply 의 용량 한계에 부딪혀 전류를 더 크게 인가하지 못하였다.

현 전자석 전류인가 시스템에서 살펴볼 수 있는 조건인 총 4 가지의 자기장 구배에서 각각의 플라즈마 밀도와 전자온도, ion beam flux 와 실제 식각에도 적용하여 자기장 구배 조건에 따른 균일도 특성에 대하여 4.3 절에서 살펴보도록 하겠다.

## 4.3 자기장 구배에 따른 균일도 특성

### 4.3.1 플라즈마 밀도 및 전자온도 균일도 특성

자기장 구배의 변화에 따른 균일도 특성에 대해 살펴보려고 한다. 우선, 직접적으로 영향을 미치는 요소인 discharge chamber 에서의 플라즈마 특성에 대하여 살펴보도록 하겠다. 자기장을 인가 하지 않았을 때, 즉 ICP source 에서의 플라즈마 특성을 추가하여 총 다섯 가지 경우 (ICP, Case 1, Case 2, Case 3, Case 4) 를 모두 살펴보도록 하겠다. ICP 조건을 제외한 Case 1 ~ Case 4 조건들은 모두 전자석에 전류를 흘려 자기장이 인가된 형태이며 반경방향으로 각기 다른 자기장 구배를 나타낸다. 전자석에 흘린 전류는 표 4.2.1 과 같다.

RF source power 는 500W 를 인가하였으며 주파수는 27.12 MHz 이고 압력은 discharge chamber 기준으로 0.4 mTorr 을 유지하였다. 자기장을 인가한 경우들은 모두 동일하게 스크린 그리드 중앙에서는 약 13 G 의 자기장이 측정되었으며 DLP 를 이용하여 플라즈마 밀도 및 전자온도를 측정하였다. 측정 높이는 스크린 그리드에서 약 30mm 위의 지점이며 반경방향으로는 스크린 그리드 중앙에서부터 반경방향으로 80mm 떨어진 위치까지 측정하였다. 스크린 그리드 중앙을 중심으로 반경 60mm 까지 구멍이 뚫려있다.

자기장 구배에 따라 플라즈마 밀도를 측정한 결과가 그림 4.3.1 에 그래프로 나타나있다. 우선, ICP 조건에서의 플라즈마 밀도는 자기장을 인가한 형태보다 약  $1/10$  에도 미치지 못한다. 자기장을 인가하는 것만으로도 플라즈마 밀도 자체는 큰 폭으로 증가한다는 것을 알 수 있다. ICP 조건을 제외한 자기장을 인가한 형태의 4가지 조건을 살펴보도록 하자. Discharge chamber 중앙에서부터 가장자리로 갈수록 플라즈마 밀도는 전반적으로 감소하는 경향을 보이고 있다.

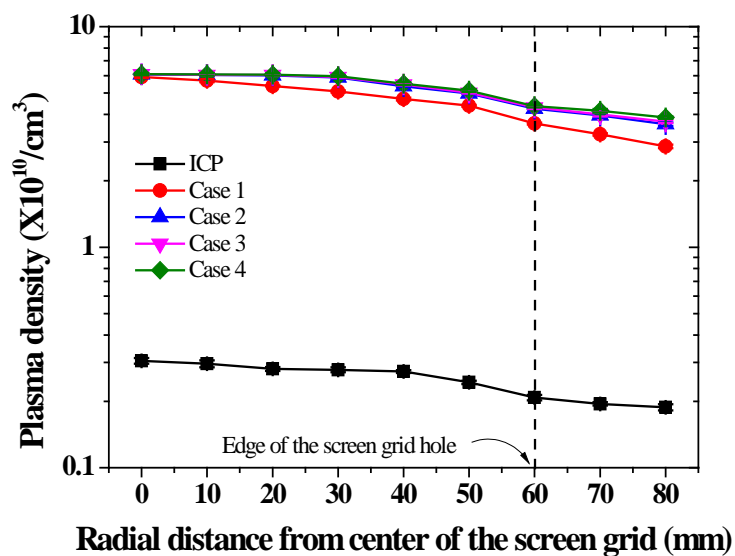


그림 4.3.1 반경방향이 증가함에 따른 플라스마 밀도 측정결과

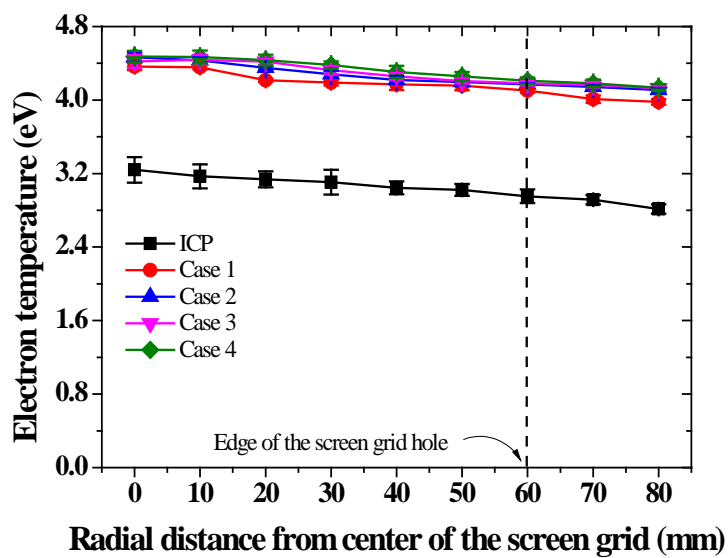


그림 4.3.2 반경방향이 증가함에 따른 전자온도 측정결과



Case 1 의 경우에는 자기장을 인가한 다른 경우보다 반경방향이 증가함에 따라 플라스마 밀도 감소 폭이 크다는 것을 알 수 있는데, 이 현상은 반경방향에 따른 자기장의 **gradient** 가 다른 조건들과 상이하기 때문이다. 반경방향이 증가함에 따라 자기장이 감소하게 되면 플라스마의 **flute instability** 가 생겨 균일도가 떨어지게 된다. **Flute instability** 특성은 플라스마 균일도 측면에서 보면 매우 중요한 요소로 작용하게 되며 이 현상에 대하여 실제 측정하여 값을 수치화 하여 비교한 연구가 진행된 바 있다[38]. 연구된 결과에 따르면, 반경방향이 증가함에 따라 자기장의 크기는 증가하여 플라스마가 불균일하게 되는 지점이 없도록 만들어줘야 하는데 Case 1 의 자기장의 구배는 그렇지 못하다. 따라서, 자기장을 인가한 다른 조건들과 확연히 구분될 정도로 반경방향 증가에 따른 플라스마 밀도가 상이하게 측정되었다.

Case 2 ~ Case 4 의 조건들은 반경방향이 증가함에 따라 자기장의 크기도 증가하는 **gradient** 를 가지고 있지만 각각의 경우마다 자기장 기울기가 다른 형태를 띄고 있다. 즉, 스크린 그리드 중앙과 가장자리에서의 자기장 증가폭이 다른 것을 알 수 있는데 기울기가 커지면 커질수록 **confinement** 효과도 증가되어 균일도 측면에서는 미세하게 유리한 것을 볼 수 있다. 그러나 자기장 **gradient** 의 부호가 반대가 될 때 만큼 큰 차이가 있지 않고 비슷하거나 미세하게 개선되는 정도라고 할 수 있다.

플라스마 밀도와 동일하게 측정한 전자온도 그래프도 그림 4.3.2 에 나타나 있다. 전자온도 역시, 자기장을 인가하지 않은 형태와 인가한 조건은 비교적 큰 차이를 보인다고 할 수 있지만 자기장을 인가한 네 가지 형태들은 비슷한 값을 가진다. Case 1 의 전자온도 값이 반경방향 위치에 따라 전반적으로 가장 낮은 값을 가지고 있지만, Case 2 ~ Case 4 의 전자온도 값이 뚜렷하게 높지 않다. 따라서 반경방향이 증가함에 따라 자기장의 세기가 증가하게 되면 전자온도 역시 균일도 측면에서 보면 유리해지지만 플라스마 밀도에서의 균일도 개선 폭에 비하면 크지 않다고 할 수 있다.

반경방향이 증가함에 따른 플라스마 밀도와 전자온도의 변화를 총 다섯가지 자기장 구배에 따라 모두 살펴보았다. 식 4.1.1을 이용하여 플라스마 밀도의 non-uniformity 값을 구할 수 있으며 이를 막대그래프로 정리해보면 그림 4.3.3과 같다. Non-uniformity 값은 백분율을 나타내는 값으로써 수치가 낮으면 낮을수록 균일도가 좋다는 것을 의미한다. Case 1 조건이 플라스마 밀도의 균일도 측면에서는 ICP 보다 더 좋지 않다. 이 현상은 자기장의 구배를 적절하지 않게 설계하게 된다면 플라스마 밀도 균일도 측면에서 큰 폭으로 손해를 보게 됨을 의미한다. ICP 주위에 자기장을 인가하여 M-ICP 로 source를 만들도록 하되, 반경방향이 증가함에 따라 자기장이 증가하도록 설계를 해야, 플라스마 밀도의 증가와 균일도 향상의 이점을 동시에 가져갈 수 있는 것이다. Case 2 ~ Case 4 의 경우를 살펴보면 모두다 자기장 구배의 알맞은 조건을 만족하지만 자기장 gradient 의 차이에 따라 균일도에서도 미세하게 차이가 발생한다. Case 2 보다 Case 3 의 경우가, 또 Case 3 보다는 Case 4 의 경우가 균일도 측면에서는 향상된 값을 가지지만 오차범위 내에 있다고 볼 수 있다. 따라서, 반경방향이 증가함에 따라 자기장의 기울기가 같이 증가하는 구배를 만드는 것이 매우 중요한 요소라고 할 수 있고, 동일한 조건에서의 자기장 기울기 차이는 큰 영향을 미친다고 보기 어렵다. 물론, 자기장의 기울기를 증가시키게 되면 자기장의 confinement 효과는 증대되겠지만 flute instability 의 유무만큼 균일도 향상에 큰 영향을 미치는 변수는 아니라고 할 수 있는 것이다.

자기장 구배의 변화에 따른 플라스마 밀도 및 전자온도의 균일도 특성에 대하여 살펴보았다. 자기장을 인가하는 효과만으로도 플라스마 밀도는 상당히 높일 수 있으며 동시에 균일도도 좋게 가져가기 위해서는 특정 조건을 만족해야 함을 알 수 있다. 특정조건을 만족하지 못하면 Case 1 의 경우와 같이 ICP 보다도 플라스마 밀도 균일도의 수치가 떨어지게 되는데, discharge chamber 에서의 이러한 특성이 그리드 아래쪽인 propagation chamber 에서의 특성과는 동일한지, 혹은 차이가 있는지 다음 절에서 자세히 살펴 보도록 하겠다.

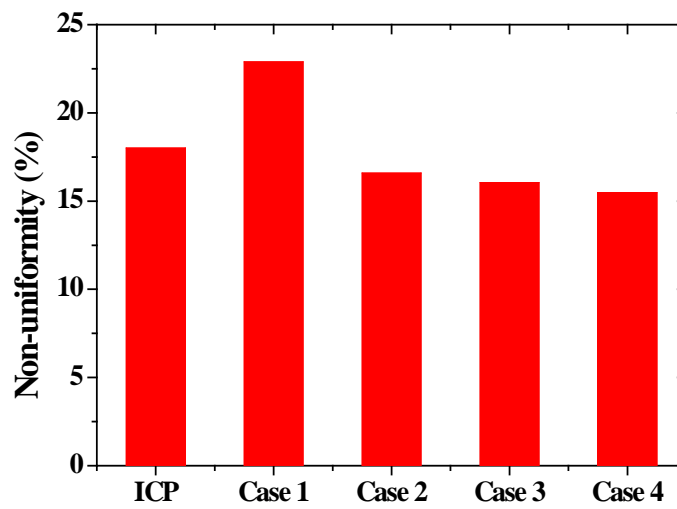


그림 4.3.3 자기장 구배에 따른 플라즈마 밀도의 불균일도 수치 비교

### 4.3.2 Ion beam flux 의 균일도 특성

4.3.1 절에서는 자기장 구배 변화에 따른 플라스마 밀도와 전자온도 균일도 특성에 대하여 자세히 살펴보았다. 이번 절에서는 자기장 구배에 따라 ion beam flux 균일도 특성이 어떻게 변화하는지 자세히 살펴보고자 한다. 앞 절에서 살펴본 바에 따르면 자기장을 인가하는 것만으로도 ICP 대비 플라스마 밀도를 큰폭으로 증가시킬 수 있으며, 자기장의 구배에 따라 플라스마 밀도의 균일도 특성이 다르게 나타난다. 스크린 그리드 센터에서부터 반경방향이 증가함에 따라 자기장의 크기가 증가해야 플라스마 flute instability 가 생기지 않게 되고, 이로 인해 결과적으로 플라스마 밀도 균일도에 개선이 된다는 것을 확인하였다. 그렇다면, 이러한 결과가 ion beam flux 에도 그대로 반영되는지 살펴보고, discharge chamber 내의 플라스마 밀도 균일도와 propagation chamber 의 ion beam flux 균일도와의 상관관계에 대하여 살펴보고자 한다.

자기장의 구배는 Case 1 ~ Case 4 까지 변화를 주었으며, ICP 조건을 추가하여 총 5가지 조건에서 살펴보았다. 압력은 discharge chamber 기준으로 0.2mTorr 이며 Source power 는 27.12 MHz 를 사용하였고 500 W 를 인가하였다. Screen grid 전압은 +300 V 를 인가하였으며 accelerator grid 전압은 -600 V 를 인가하였다.

ICP, Case 1, Case 2, Case 3 그리고 Case 4 조건에서 반경방향 위치에 따른 IED 측정한 결과가 그림 4.3.4 부터 4.3.8 까지 나타나 있다. Substrate 위에서 측정하였으며 IEA 를 10 mm 씩 이동시키면서 측정하였다. 모든 조건들 모두 중앙에서 가장자리로 갈수록 IED peak 높이가 감소하는데 이는 ion flux 감소를 의미한다. 이 결과를 ion beam flux 로 나타내서 각각의 조건들을 비교해 보면 그림 4.3.9와 같다. ICP 의 ion beam flux 는 자기장을 인가한 경우와 비교했을 때 scale이 큰 차이가 난다. 이는 플라스마 밀도가 자기장 유무에 따라 큰 차이가

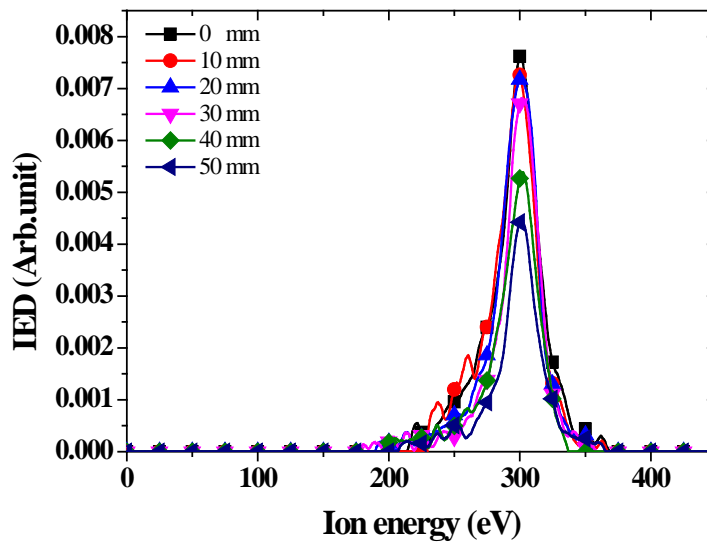


그림 4.3.4 ICP 조건에서 반경방향 위치에 따른 IED 측정결과

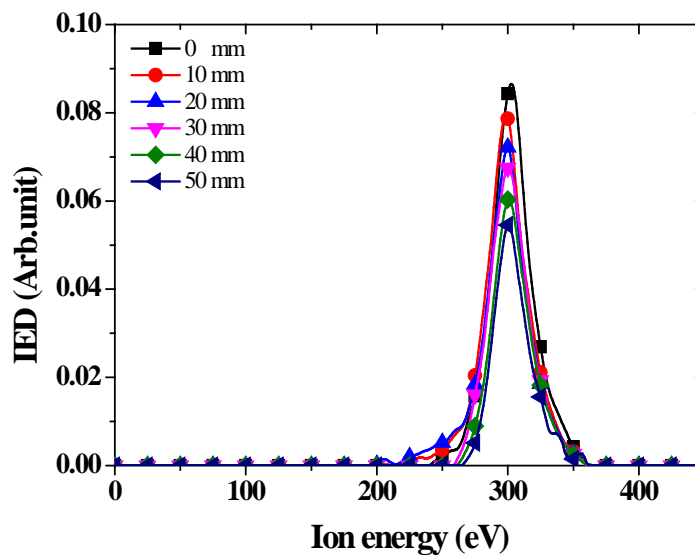


그림 4.3.5 Case 1 조건에서 반경방향 위치에 따른 IED 측정결과

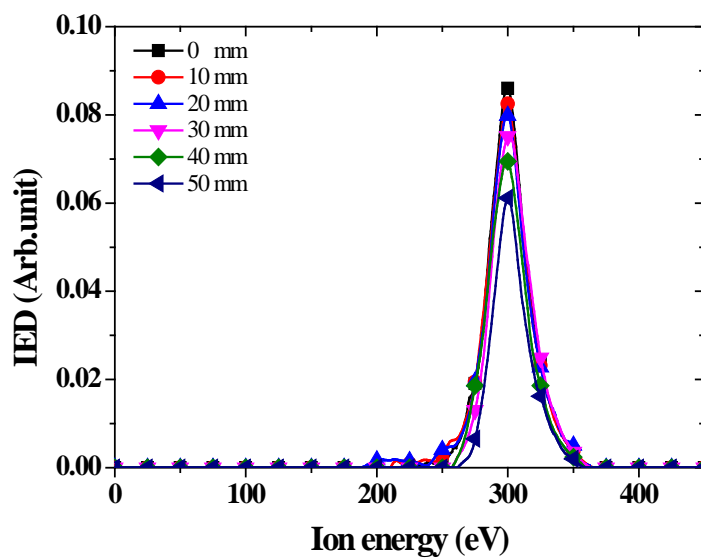


그림 4.3.6 Case 2 조건에서 반경방향 위치에 따른 IED 측정결과

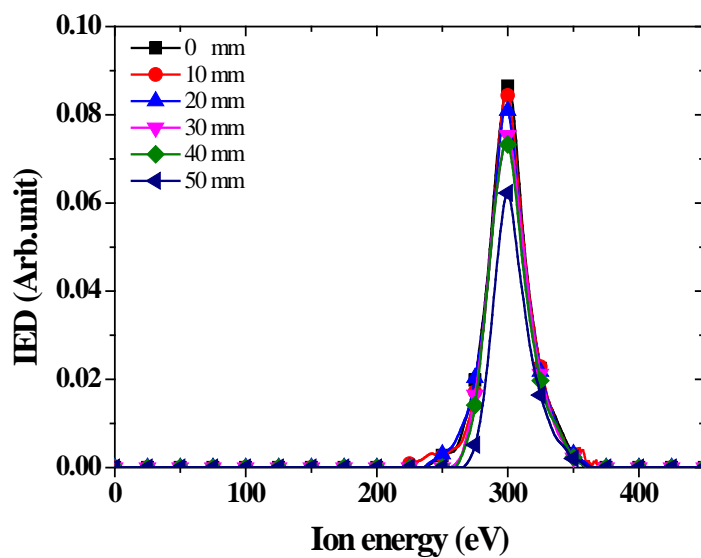


그림 4.3.7 Case 3 조건에서 반경방향 위치에 따른 IED 측정결과

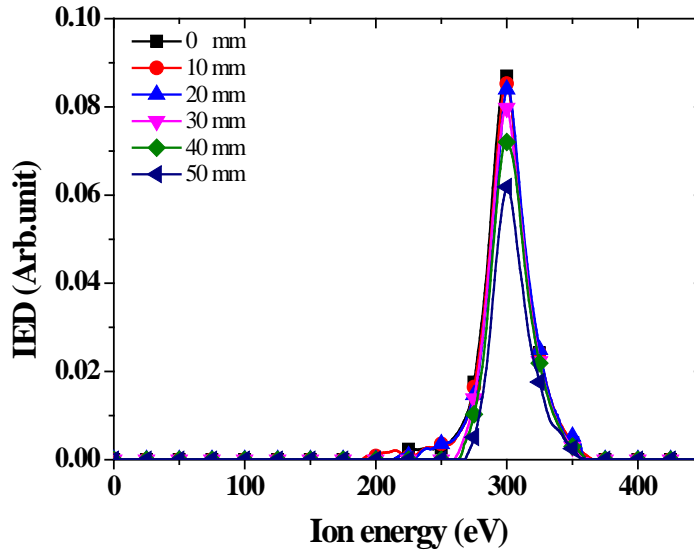


그림 4.3.8 Case 4 조건에서 반경방향 위치에 따른 IED 측정결과

있기 때문이다. 자기장을 인가한 경우인 Case 1 ~ Case 4 의 경우를 살펴보도록 하자.

자기장을 인가하게 되면 플라스마 밀도가 ICP 에 비하여 큰 폭으로 증가하기 때문에 ion beam flux 역시 증가한 것을 볼 수 있는데, 자기장 구배에 따라서도 미세한 차이가 있다. 모든 조건들이 기판 중앙에서 가장자리로 갈수록 ion flux 가 감소하는 것을 볼 수 있는데, 감소하는 폭이 Case 1 과 다른 자기장 인가한 경우와 큰 차이가 있다. Case 1 의 경우에는 중앙에서 반경방향이 증가함에 따라 자기장이 감소하는 형태의 gradient 를 가지고 있어 다른 경우와 차별화된다. 이에 따라 flute instability 가 발생하여 플라스마 밀도 균일도에서도 큰 손실을 가져오는 것을 살펴보았는데, 이러한 현상은 ion flux 에서도 고스란히 나타나게 된다. Case 2 ~ 4 의 경우는 반경방향 증가에 따른 자기장의 gradient 는 다르지만 증가하는 형태의 자기장을 가지고 있다. 따라서 flute instability 가 발생하지 않아서 플라스마 밀도의 균일도가 향상되고 screen grid

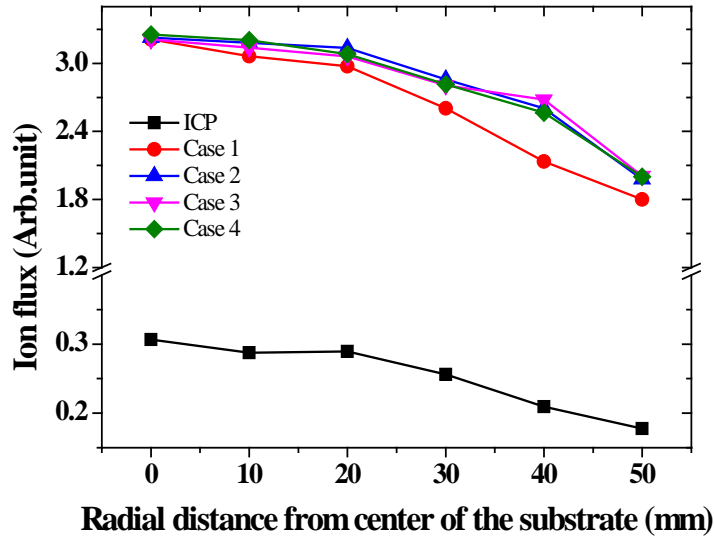


그림 4.3.9 반경방향 위치에 따른 ion flux 측정결과

위에서 형성되는 플라스마 밀도의 균일도 향상으로 인하여 ion flux의 균일도에도 그대로 영향을 미치게 된다. 각각의 조건들의 ion flux 값을 non-uniformity 수치를 구하는 식에 대입하여 나타난 그래프가 그림 4.3.10과 같다. Case 1의 균일도 특성이 가장 좋지 않으며, ICP가 Case 1 다음으로 좋지 않다. Case 2~4의 경우는 모두 비슷한 균일도 특성을 보이고 있으며 ICP보다 더 향상된 균일도 특성을 보이고 있다.

균일도 특성을 우수하게 만들기 위해서는 반경방향에 따른 자기장의 크기가 커지도록 설계하는 것이 가장 중요하다고 할 수 있다. 자기장의 크기가 증가하는 형태에서는 gradient에 차이가 있더라도 거의 비슷한 균일도 특성을 얻을 수 있게 된다. 자기장 gradient가 커짐에 따라 confinement 효과도 커지지만, 균일도 특성에 미치는 영향은 미미하다고 볼 수 있고, dominant한 변수는 flute instability 특성이다. 플라스마 주변에 자기장이 존재할 시에는 이를 잘 고려하여 설계해야 높은 ion flux를 얻음과 동시에 균일도도 높게 가져갈 수 있다.



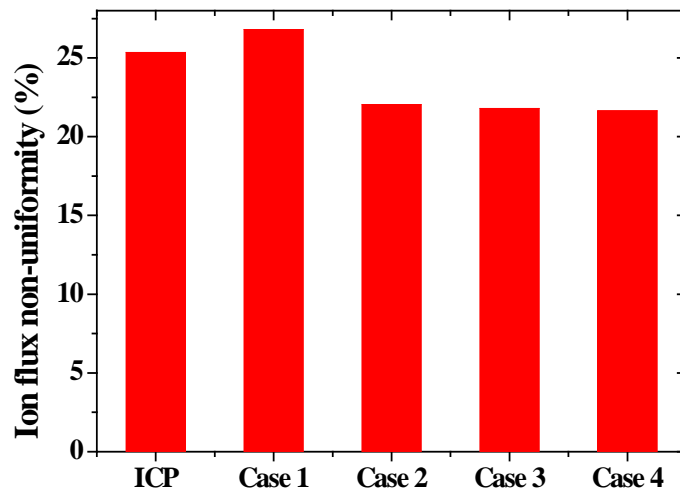


그림 4.3.10 자기장 구배에 따른 ion flux 불균일도 수치 비교

### 4.3.3 식각 균일도 특성

이온 빔 식각 장치는 기본적인 특성상 그리드를 통과한 Ar 이온들에 의하여 물리적인 sputter etching 이 이뤄지게 된다. 이온 에너지는 그리드에 의해 control 될 수 있으며 이에 따라 사용자가 원하는 이온 에너지를 이용하여 식각을 할 수 있다. 이온 에너지를 조절함으로써 식각물질의 etch rate 을 control 할 수 있을 뿐만 아니라 식각된 물질에 미친 ion damage 도 control 할 수 있게 된다. 여기에서 큰 이슈가 이온에너지가 크게 되면 당연히 etch rate 은 증가하겠지만 반대 급부로 ion damage 도 증가한다는 사실이다. 이러한 단점이 발생하기 때문에 또 다른 etch rate 증가 요소인 ion flux 에 초점을 맞추게 된다. 자기장 구배에 따른 ion flux 과 균일도 특성은 앞 절에서 자세히 살펴보았으며 물질의 식각시에는 어떤 특성이 있는지 이번 절에서 자세히 살펴보려고 한다.

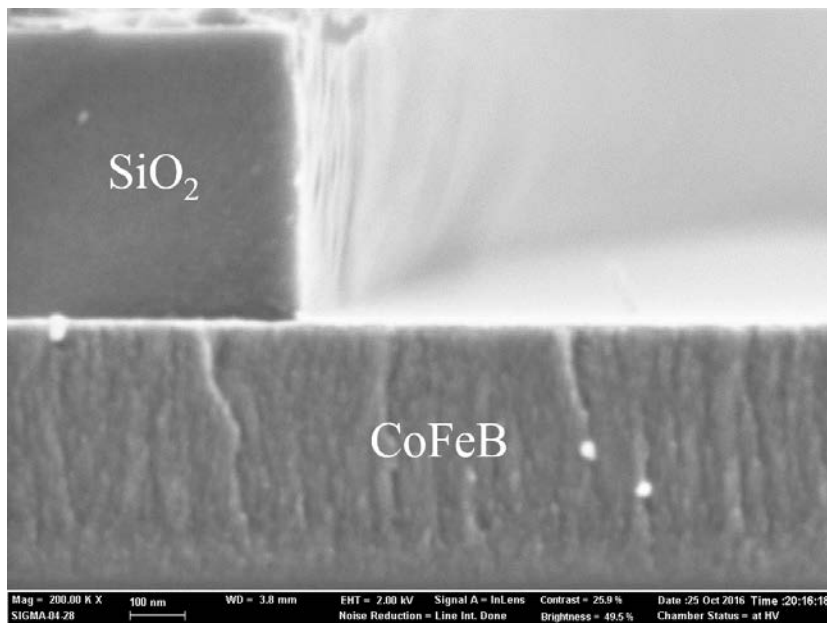
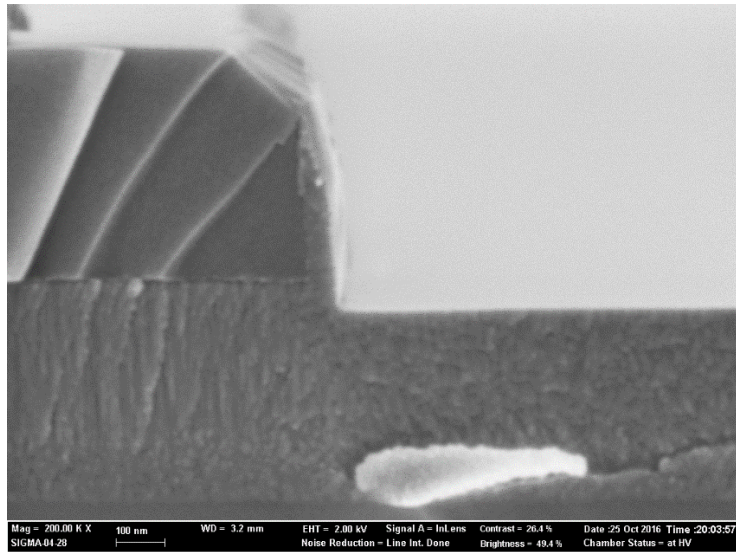


그림 4.3.11 식각 전 CoFeB sample

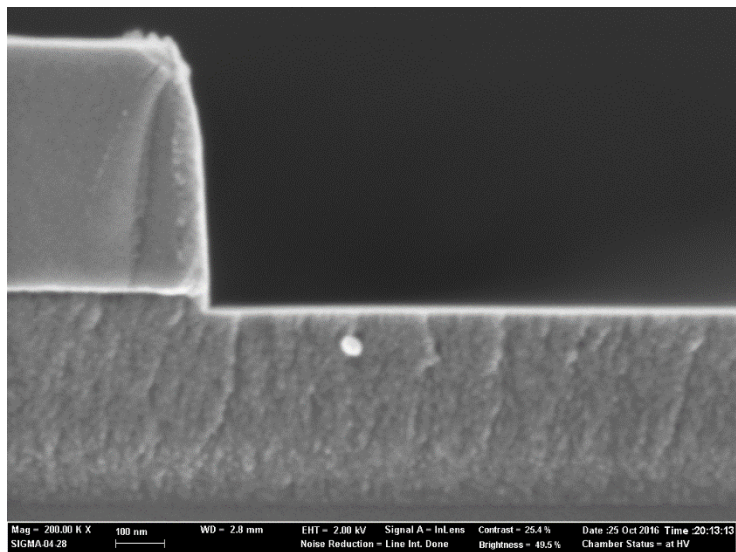
식각에 사용된 sample 은 CoFeB (56/24/20) 을 사용하였는데 이 물질은 New memory 소자로 연구중인 Magnetic Random Access Memory (MRAM) 에 들어가는 여러가지 물질 중 하나이다. 이 물질에 대해서는 5장에서 자세히 설명하도록 하겠다. 마스크는 SiO<sub>2</sub> 를 사용하였으며 그림 4.3.11 과 같이 line and space 패턴이 된 샘플을 제작하였다. 마스크 높이는 약 500 nm 이고, space 폭은 약 1600 nm 이며 식각되는 물질인 CoFeB 의 두께는 약 500 nm 이다.

앞 절에서 설명한 바와 같이 ICP 조건과 더불어 자기장이 다른 구배 조건들 (Case 1 ~ Case 4) 포함 총 5가지 조건에서 식각실험을 하였다. 기판의 중앙 (0mm)에서부터 기판 가장자리 (50mm) 까지 반경방향 10mm 지점 간격으로 샘플을 위치시켰다. 이온 빔 식각 장치 특성상 기판을 tilt 할 수 있는 기능이 있지만 사용하지 않고 flat 한 상태에서 식각실험을 하였다. Tilt 시에 이온 입사각에 변화가 생겨 etch rate 역시 변하게 되는데 이는 5장에서 자세히 살펴보도록 한다. 압력은 propagation chamber 기준으로 0.2 mTorr 로 고정하였으며, RF source power 는 500 W (27.12 MHz) 를 인가하였다. Screen grid 와 accelerator grid 는 각각 positive 300 V, negative 600 V 를 인가하였고 4분 동안 식각을 하였다. 재현성 확인을 위해 이와 같은 반복 식각실험을 5 회 진행하였다.

그림 4.3.12 (a) 는 Case 2 조건에서 기판 중앙 (0mm) 에서의 식각 후 SEM image 이며 그림 4.3.12 (b) 는 같은 조건이지만 기판 끝 (50mm) 에서의 식각 후 SEM image 이다. 같은 조건이라도 기판 위치에 따라 etch depth 가 차이가 나는 것을 확인 할 수 있다. 이를 각기 다른 자기장 조건과 반경방향 위치에 따라 etch rate 을 모두 정리해서 그래프에 나타내 보면 그림 4.3.13 과 같다. 자기장을 인가한 4가지 조건의 기판 중앙에서의 etch rate 은 대략 14 nm/min 이다. ICP 포함 모든 조건이 기판 가장자리로 갈수록 etch rate 이 감소하는 형태를 보이게 되며 Case 1 의 감소폭이 Case 2 ~ Case 4 의 경우보다 훨씬 큰 것을 알 수 있다.



(a) 기판 중앙 위치(0mm)



(b) 기판 가장자리(50mm)

그림 4.3.12 (a) 기판 중앙위치 (b) 가장자리에서의 식각 후 SEM image

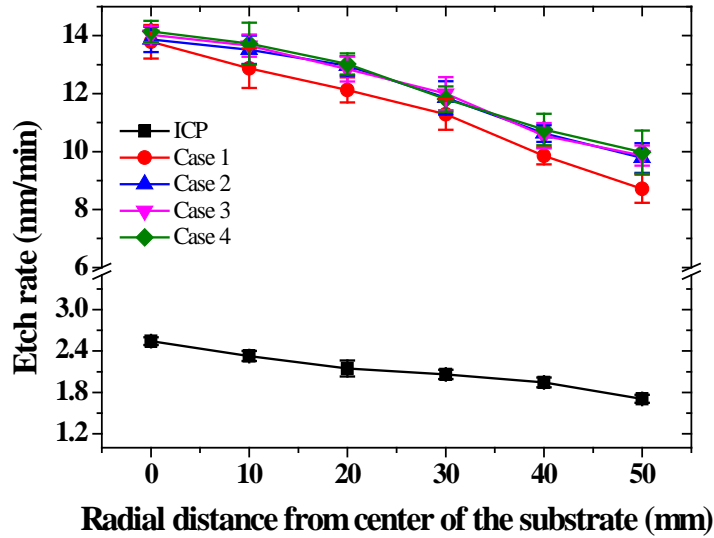


그림 4.3.13 반경방향 위치에 따른 etch rate 측정결과

Case 1 의 조건은 반경방향에 따른 자기장의 크기가 감소하는 형태로써 자기장을 인가한 다른 세가지 경우 (Case 2 ~ Case 4) 의 경우와 자기장 gradient 부호 자체가 다르다. 이로 인해 Case 1 의 경우는 flute instability 가 발생하여 plasma density 와 ion beam flux 에도 영향을 미쳐 균일도 특성이 좋지 않음을 앞서 기술하였으며, 최종적으로는 etch rate 에도 영향을 미치게 되는 것이다.

그림 4.3.13 에 정리된 etch rate 의 결과도 ion beam flux 의 결과와 거의 유사한 형태임을 알 수 있다. 이러한 이유는 역시 이온 빔 식각 장치에서 etch rate 은 이온 에너지와 ion beam flux 에 의해 영향을 받게 되는데 이온 에너지는 모두 동일하게 맞췄기 때문에 4.3.2 절에서 측정한 ion beam flux 의 결과 그래프의 형태가 etch rate 결과에도 고스란히 나타난다고 볼 수 있는 부분이다. Etch rate 결과를 바탕으로 각 조건별로 non-uniformity 값을 측정한 것이 그림 4.3.14 에 나타나있다. 기판 가장자리로 갈수록 etch rate 감소폭이 가장 큰 Case 1 의 조건이 균일도 특성이 가장 좋지 않은 것으로 non-uniformity 값이

측정되었다. ICP 보다는 Case 2 ~ Case 4 의 조건이 식각 균일도 특성이 우수한 것으로 측정되었으며 반경방향에 따라 자기장이 증가하는 기울기를 가지는 Case 2 ~ Case 4 의 세가지 조건들은 거의 비슷한 균일도 특성을 보여주고 있다.

이온 빔 식각 장치의 기본적인 특성상 사용자가 원하는 이온 에너지를 인가할 수 있는데 동일하게 이온에너지를 가져가게 될 경우에 etch rate 에 가장 큰 영향을 주는 부분은 ion beam flux 라고 할 수 있다. 따라서 높은 etch rate 을 얻기 위해서는 높은 ion beam flux 의 설계가 필수적이라고 할 수 있다.

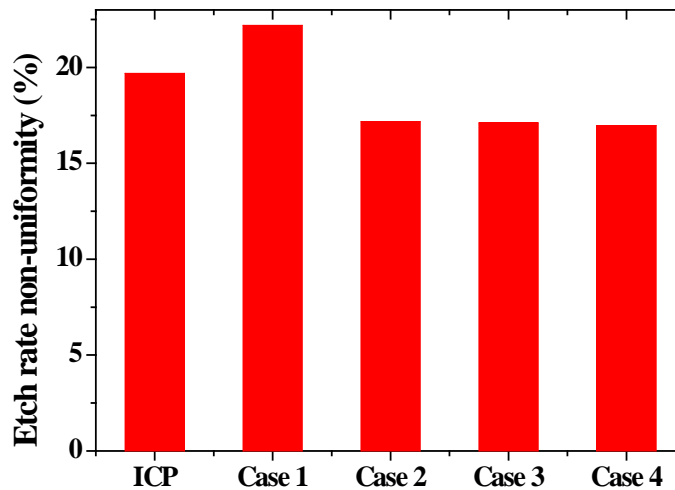


그림 4.3.14 자기장 구배에 따른 etch rate 불균일도 수치 비교

## 4.4 그리드 구멍의 밀도 분포에 따른 균일도 특성

### 4.4.1 그리드 구멍의 밀도 분포의 설계

지금까지는 자기장 가변을 통해 균일도를 향상시키기 위한 연구를 진행하였지만 개선된 non-uniformity 수치가 약 17 % 인 상태로써, 자기장 구배로 인한 균일도 개선은 한계를 보이는 모습이었다. 기판의 가장자리로 갈수록 ion beam flux 가 감소하는 현상은 이온 빔 식각 장치의 기본 특성이라고 할 수 있다 [54]. 이러한 기본 특성을 뒤집어 보고자 새로운 아이디어를 생각하였다. 일반적인 그리드는 그림 4.4.1 과 같이 구멍들 사이의 간격이 균일하게 뚫려있다. Discharge chamber 에서 가우시안 분포를 가지는 플라즈마가 생성된다면 그리



그림 4.4.1 균일한 구멍 분포를 가지는 conventional grid 모습

드의 구멍을 이온들이 통과하게 되고, 그리드 아래쪽의 ion beam flux 분포 역시도 discharge chamber 의 가우시안 분포와 같을 수밖에 없는 것이다. 이러한 원리에 착안하여, discharge chamber 에서의 플라즈마가 생성된 것을 좀 더 균일하게 만들어보고자 한 것이 바로 4.3장에서 자세히 다룬 자기장 구배에 따른 균일도 특성이다. 이에 한걸음 더 나아가, discharge chamber 에서의 플라즈마 분포를 변화시키는 것에 한계가 있으니 물리적으로 그리드에 변화를 주어 propagation chamber 의 ion beam flux 의 균일도를 개선시키는 컨셉이 본 챕터라고 할 수 있다. 물리적인 그리드 변화라고 하는 것은 그리드에 뚫려있는 구멍의 밀도 변화이다. 물리적인 그리드 변화는 구멍 밀도의 변화뿐만 아니라 구멍의 지름을 크게 하는 것도 하나의 방법이 될 수 있을 것이다. 그리드 중앙에서 가장자리로 갈수록 구멍을 크게 가져간다면, 구멍이 넓어진 만큼 ion beam flux 역시도 가장자리에서 증가할 것으로 예상되기 때문이다. 그러나, 이러한 방법을 사용하게 되면 같은 밀도에서 동일한 쉬스를 형성하지 못하게 될 가능성이 매우 크다. 3장에서 살펴본 바와 같이 플라즈마 밀도와 그리드 구멍의 지름에 따라 쉬스 형태가 달라지게 되고 ion beam focus 에도 큰 영향을 미치게 된다. 그리드의 반경에 따라 구멍의 지름이 달라지게 되면 어느 한 구역이 블록한 sheath 형성으로 인해 ion beam focus 가 효율적으로 이뤄지게 되면, 다른 한 구역은 오목한 sheath 형성으로 비효율적으로 ion beam focus 가 이뤄질 가능성이 높게 되기 때문이다. 이러한 이유로 그리드내의 구멍의 지름은 동일하게 가져가면서, 중앙대비 가장자리의 구멍의 밀도를 높이려고 하는 것이다. 이상적으로는 continuous 하게 구멍의 밀도를 증가시키면 좋겠지만, 도면을 그릴 것을 바탕으로 실제 가공을 들어가게 되면 이상적인 것을 구현하기에는 한계가 있다. 한계라는 것은 도면을 그릴 때 발생하는 한계와 물리적인 가공시에 생기는 한계이다. 도면을 그릴 때는 hexagonal array 로 구멍을 배열하게 되는데, 반경방향이 증가함에 따라 구멍과 구멍사이의 간격을 continuous 하게 좁히게 되면 배열에 불규칙적으로 이뤄지게 된다. 계산상으로 정확히 맞아떨



어지기가 힘든 부분이기 때문이다. 만약에 이상적으로 배열된 도면을 그렸다고 할지라도 이를 실제 가공으로 옮길 시에는 물리적으로 가공 가능한 수치한계가 존재한다. 실제 그리드를 가공하는 전문업체에서의 가공 한계는 소수점 첫째자리 mm 까지 가공이 가능하였다. 가령, 지름 1.7 mm 와 1.6 mm 의 차이로 가공은 가능하지만 1.65 mm 의 지름으로는 불가능한 것이다. 이러한 한계들 때문에 그리드 영역을 임의로 세 구역으로 나눈 후, 구역에 따라서 구멍과 구멍 사이의 간격을 다르게 디자인 하였다.

그리드 구멍이 뚫려있는 부분은 반지름 60 mm 인 원의 형태이다. 반경방향 20 mm 간격으로 구역을 나눠서 0 ~ 20 mm 까지 동심원에서 구멍사이 금속의 두께는 1.1 mm 이다. 반경 20 mm ~ 40 mm 구간에서의 구멍사이 금속의 두께는 0.9 mm 이며, 반경 40 mm ~ 60 mm 구간의 구멍사이 금속의 두께는 0.7 mm 이다. 물리적으로 가공가능한 구멍사이의 금속의 최소 폭은 0.7 mm 였으므로 가장자리는 가공 가능한 최소 간격으로 디자인 한 것이다. 이를 CAD 를 이용하여 도면에 설계한 것이 그림 4.4.2 에 나타나있다.

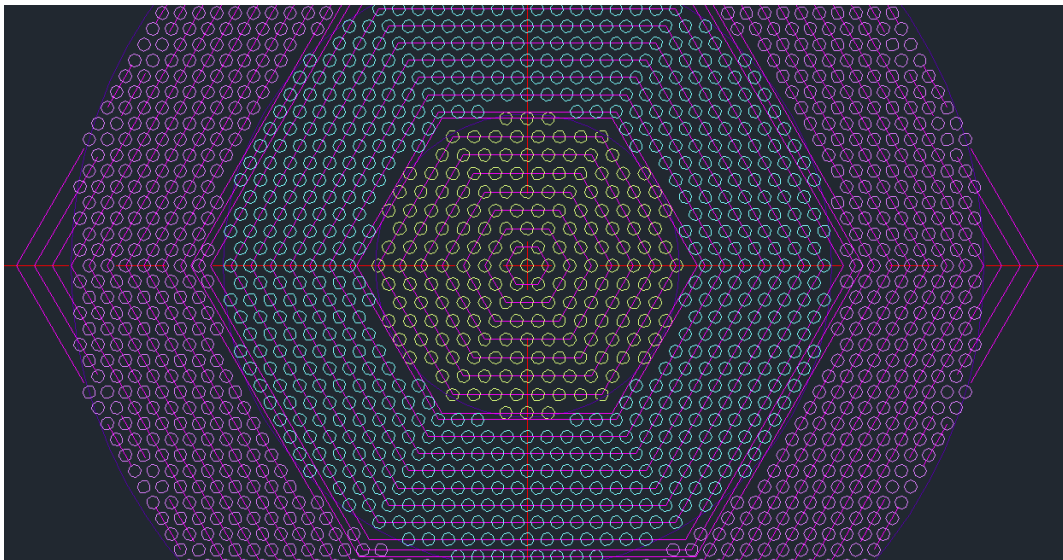


그림 4.4.2 구멍 밀도의 차이에 따른 그리드 설계 도면

CAD 로 그려진 도면을 그대로 가공을 하여 완료한 그리드의 모습은 그림 4.4.3 과 같다. 육안으로 보기에다 그리드의 중앙지역 대비 가장자리 구멍들의 밀도가 높은 것을 확인할 수 있다.

완성된 screen grid 의 구멍 지름은 1.7 mm 이고, accelerator grid 구멍의 지름은 1.4 mm 이다. 이와 같은 형태로 그리드를 새로 제작하여 가장자리에 많은 구멍을 뚫어서 ion beam flux 를 향상시키고자 하는 아이디어가 실제 측정시에는 어떻게 나타나는지, 이를 식각 공정에 응용하였을때는 구멍이 균일하게 뚫린 그리드 보다 높은 균일도 특성을 얻을 수 있는지 자세히 살펴보도록 하겠다.

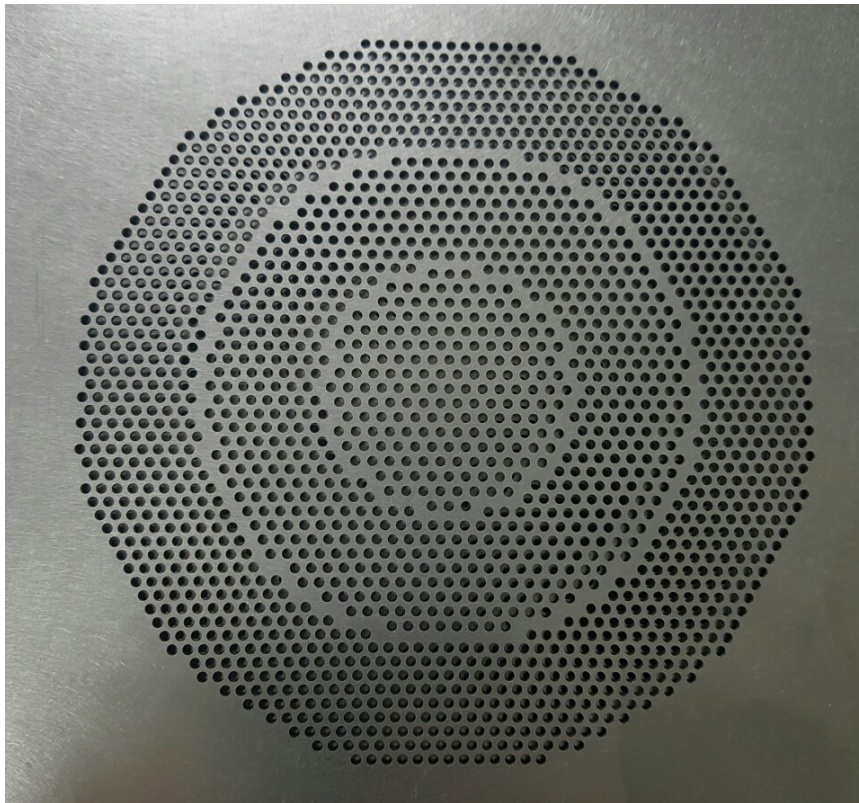


그림 4.4.3 새롭게 제작된 불균일 hole density 를 가지는 그리드

#### 4.4.2 Ion beam flux 의 균일도 특성

앞 절에서 새로 설계한 그리드에 대하여 살펴보았다. 새로 제작된 그리드는 그리드 중앙에서 가장자리로 갈수록 구멍의 밀도를 높여 ion beam flux 를 높여 주고자 하는 목적으로 디자인 되었다. 이에 대한 목적이 현실적으로 효과가 있는지에 대하여 IEA 를 이용하여 ion beam flux 를 측정해보았다. 구멍이 균일하게 있는 그리드를 conventional grid, 균일도 개선의 목적으로 새로 제작된 그리드를 proposed grid 라고 부르도록 하겠다. Old grid 의 구멍사이의 금속의 두께는 1.1 mm 으로서 new grid 에서의 가운데 동심원 부분 (0 mm ~ 20 mm) 에 있는 구멍 간격이 그리드 전체에 분포 하는 형태이다.

Conventional grid 와 proposed grid 모두 그리드에 뚫려있는 구멍의 지름은 모두 동일하고 전체적으로 구멍이 있는 범위 역시 동일하다. Screen grid 구멍의 지름은 1.7 mm 이고 accelerator grid 구멍의 지름은 1.4 mm 이다. 방전 가스는 전 실험들과 동일하게 Ar 을 사용하였으며 gas flow rate 은 3.5 sccm 으로서 propagation chamber 기준으로 압력은 0.2 mTorr 로 고정하였다. 전자석 전류 인가는 Case 2 조건으로 안가하여 그리드 중앙에는 약 13 G 자기장이 형성되도록 하였다. RF source power (27.12MHz) 는 900 W<sub>s</sub> 를 인가하였으며 Screen grid voltage 와 accelerator grid voltage 는 각각 positive 300 V, negative 600 V 를 인가하였다.

새로 제작된 proposed grid 의 경우에는 물리적인 디자인의 한계로 인해 구멍 밀도가 급변하는 boundary 에서 그림 4.4.3 과 같이 구멍이 없는 영역이 생기게 된다. Boundary 는 반지름 20 mm 지점과 40 mm 지점이다. 반지름 위치에 따른 IEA 를 측정할 때 구멍이 없는 영역인 boundary 에서는 결과 그래프에서 제외하도록 한다. Boundary 지점에서 ion beam flux 를 측정해보았으나 다른 영역에 비해 현저히 낮게 측정되었다. 따라서 boundary 위치를 제외한 지점, 즉,

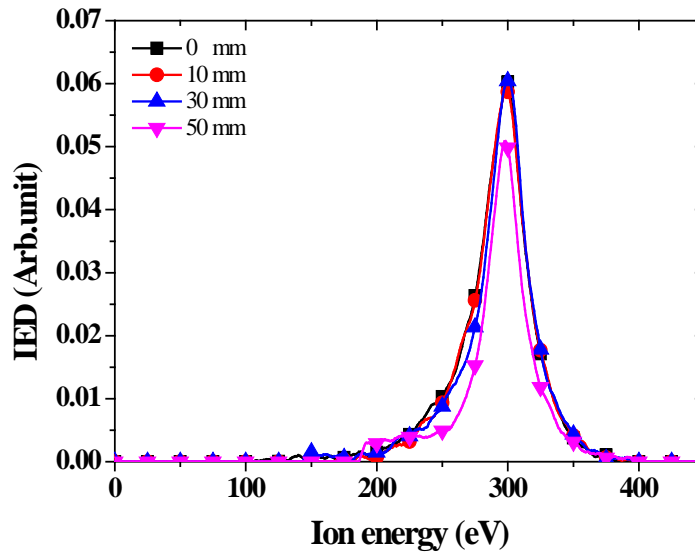


그림 4.4.4 Proposed grid 사용시에 반경방향 위치에 따른 IEDA

반지름 기준으로 0 mm, 10 mm, 30 mm, 50 mm 에서 각각 IED 를 측정하였으며 그래프로 나타내면 그림 4.4.4 와 같다.

Screen grid voltage 는 300 V 이므로 반경 위치에 따른 이온 에너지는 거의 동일하게 300 V 에서 peak 가 생긴다. 일반적으로 conventional grid 사용시에는 4.3.2 절에서 자세히 살펴본 바와 같이 반경방향 위치에 따라 이온 에너지 peak 의 높이에 차이가 생기게 되고 기판 가장자리로 갈수록 이온 에너지 peak 는 감소하게 된다. 하지만 proposed grid 를 사용하여 측정된 IED 그래프를 보면, 0 mm ~ 30 mm 까지는 거의 차이가 없는 것을 확인 할 수 있다. 이온 에너지 peak 높이가 거의 비슷하게 측정되었으며 50 mm 에서는 이온에너지 peak 가 낮아진다. IED 그래프를 적분하여 ion flux 로 나타낸 뒤 conventional grid 사용시의 ion flux 와 비교하여 결과를 나타내 보았다.

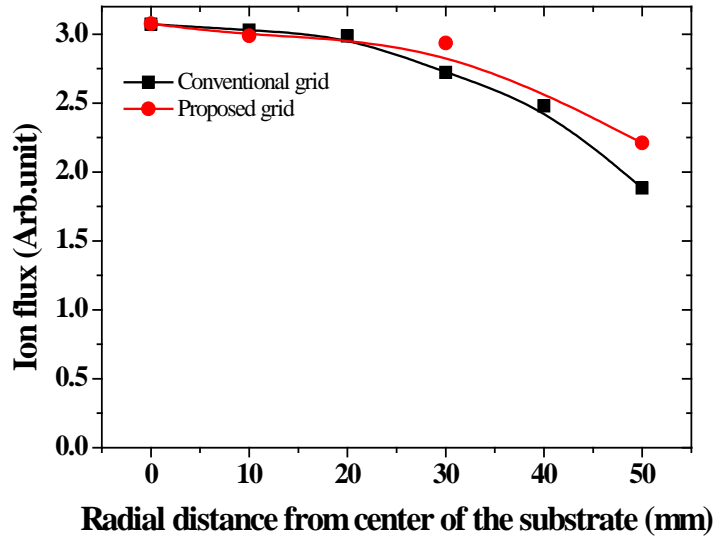


그림 4.4.5 반경방향 위치에 따른 ion flux 비교

그림 4.4.5 는 conventional grid 사용시와 proposed grid 사용할 때 반경방향 위치에 따라 ion flux 를 측정하여 나타낸 그래프이다. Old grid 사용시에는 구멍이 균일하게 분포되어 있으므로 반경 10 mm 간격으로 모든 위치에서 측정이 가능하였으나 proposed grid 사용시에는 boundary 부분 (20 mm, 40 mm) 은 올바른 측정이 불가능 하였으므로 0 mm, 10 mm, 30 mm, 50 mm 부분에서만 측정이 가능하였다. 반경위치 20 mm 부분과 40 mm 부분은 직접적인 비교는 못하였지만 나머지 위치에서는 직접 비교가 가능하였다. Proposed grid 를 사용하게 되면 기판 중앙근처 (0 mm 와 10 mm) 에서 측정된 ion flux 는 old grid 사용시와 거의 비슷하였으나 반경위치 30 mm 지점과 50 mm 지점에서는 큰 차이를 보이고 있었다. Conventional grid 대비 proposed grid 에서는 30 mm 와 50 mm 반경 위치에서는 더 높은 구멍의 밀도를 가지게 되는데 구멍 밀도가 높은 만큼 ion flux 가 더 높게 측정되는 결과를 얻었다고 볼 수 있다. 위의 ion flux 측정결과를 균일도 특성을 알아볼 수 있도록 non-uniformity 수치로 나타내보면 그림 4.4.6 과

같다. 30 mm 과 50 mm 지점의 위치에서 proposed grid 사용시에 더 높은 ion flux 가 측정되었으므로 이를 그대로 non-uniformity 수식에 넣어서 계산해보니 proposed grid 사용시에는 약 15.44 % 이고 conventional grid 사용시에는 22.03 % 였다. Proposed grid 에서는 반경 위치 20 mm ~ 40 mm 영역과 40 mm ~ 60 mm 영역에서 conventional grid 대비 더 높은 구멍의 밀도를 가져 감으로써 약 7 % 정도의 non-uniformity 수치를 감소시킬 수 있었으며 균일도 개선에 큰 영향을 끼쳤음을 확인 할 수 있었다. 자기장 구배에 따라 균일도를 개선할 방법도 있지만 그리드 가장자리의 구멍 밀도를 증가시킴으로써 ion flux 의 균일도 개선도 큰 폭으로 시킬 수 있음이 확인되었다. 한 편, 식각실험을 통해 측정된 ion flux 균일도와 etch rate 균일도의 관계에 대해 다음절에서 자세히 살펴보도록 하겠다.

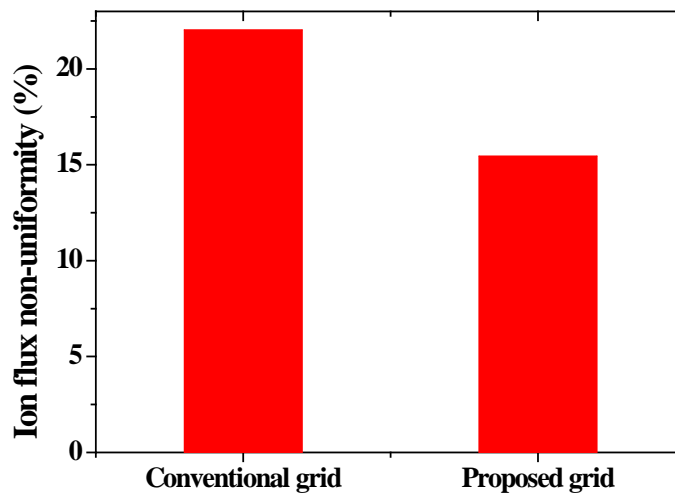


그림 4.4.6 그리드 종류에 따른 ion flux 불균일도 수치 비교

### 4.4.3 식각 균일도 특성

Proposed grid 를 설계하여 conventional grid 의 ion flux 균일도 특성을 비교해 보니 proposed grid 사용시에 더 향상된 균일도 특성을 확인할 수 있었다. 이러한 ion beam 의 특성이 식각 공정에서는 어떤 상관관계에 있는지 살펴보기로 하자.

식각에 사용되는 샘플은 4.3.3 절 식각 실험에 사용되었던 샘플로써  $\text{SiO}_2$  를 마스크로 사용하고 그 아래에는 CoFeB layer 가 약 450 nm deposition 되어있으며 line & space 패턴을 가지고 있다. 식각 실험시에 사용된 자기장은 Case 2 조건을 사용하였으며, Ar gas 를 3.5 sccm 흘려서 propagation chamber 기준으로 압력은 0.2 mTorr 로 고정하였다. RF source power (27.12 MHz) 는 900 W<sub>s</sub> 를 인가하였으며 screen grid 와 accelerator grid 는 각각 positive 300 V, negative 600 V 를 인가하였다. 식각 샘플은 반경방향 위치 기준으로 0 mm, 30 mm, 50 mm 에 위치시켰으며 substrate 의 tilt 기능은 사용하지 않아 flat 한 상태를 유지시켰다. Conventional grid 와 proposed grid 를 사용하는 경우에서 각각 식각 실험을 진행하였으며 모두 위와 같이 동일하게 실험조건을 맞춰주었다.

그림 4.4.7 은 conventional grid 와 proposed grid 사용시에 반경방향 위치에 따른 식각 후의 SEM image 이다. 비교를 수월하게 하기 위해 동일한 위치의 SEM image 를 대응시켰고 mask 와 CoFeB layer 사이에 흰색 점선으로 평행선을 그어 두 개의 SEM image 에서 패턴의 높이를 일치시켰다. 같은 높이로 맞춘 SEM image 에서 proposed grid 사용시의 etch depth 에 맞는 흰색 점선 평행선을 연장하여 conventional grid 사용시와 직접 비교해보았다. 0 mm 지점에서는 conventional grid 와 proposed grid 사용시 모두 거의 동일한 etch depth 를 보이고 있었다. 반면에 30 mm 와 50 mm 지점에서는 proposed grid 사용시의 etch depth 가 conventional grid 사용시보다 더 깊은 것을 확인 할 수 있었다.



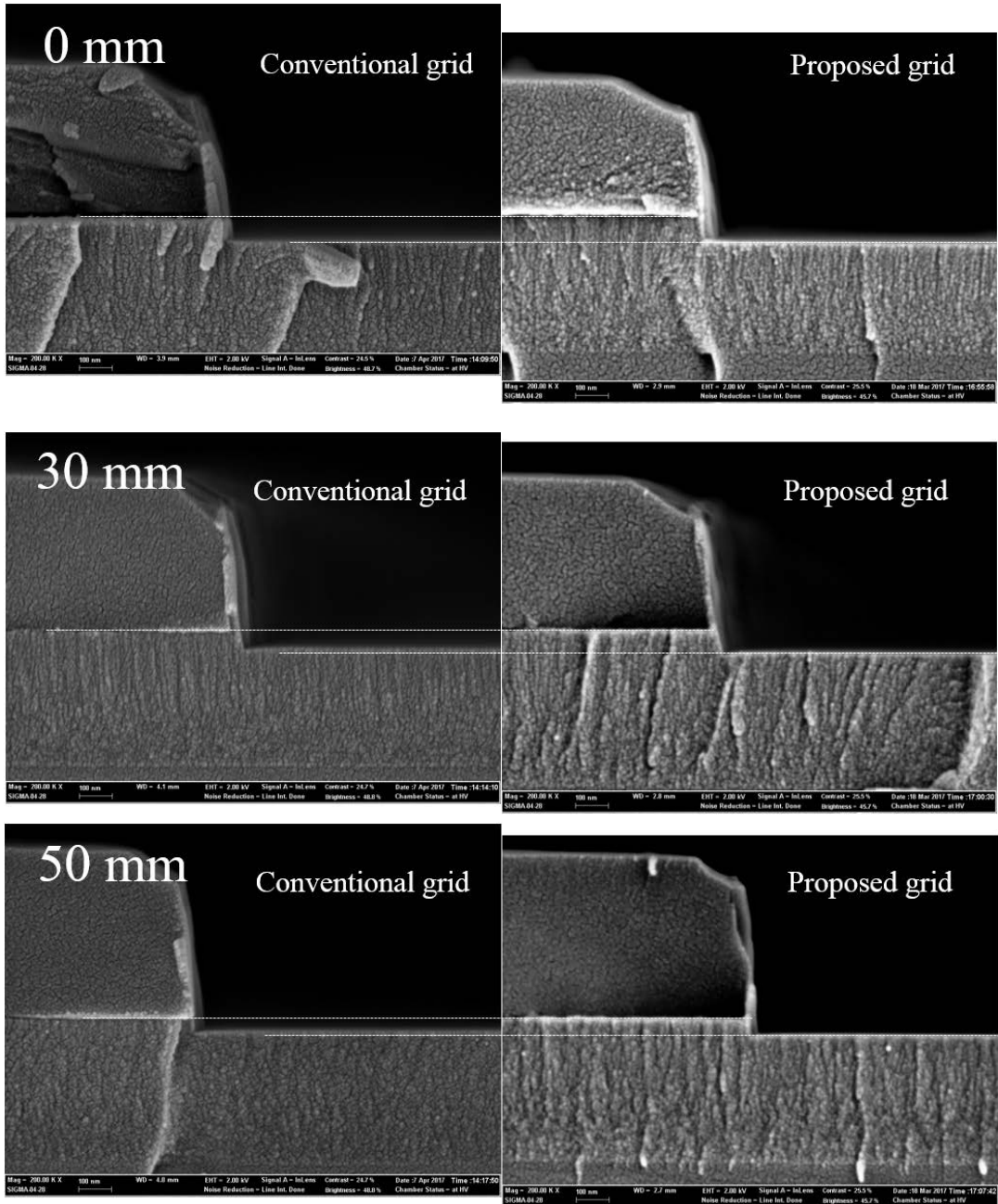


그림 4.4.7 반경방향 위치에 따른 식각 후 SEM image (Old grid and new grid)



식각 실험을 총 5회 반복하여 식각 결과를 그래프로 나타내 보면 그림 4.4.8 과 같다. Etch rate 을 살펴보면 0 mm 위치에서는 conventional grid 와 proposed grid 사용시에 거의 비슷한 것을 확인 할 수 있다. 그러나 30 mm, 50 mm 지점은 proposed grid 사용시에 etch rate 이 더 높게 측정되었다. Proposed grid 를 사용하게 되면 0 ~ 30 mm 지점까지는 etch rate 이 감소하지 않고 거의 비슷하게 유지되다가 50 mm 지점에서는 감소하는 형태를 보이지만 conventional grid 사용시에는 0 mm ~ 50 mm 까지 지속적으로 etch rate 이 감소하게 된다. 식각 결과는 4.4.2 절에서 살펴본 ion flux 측정결과와 유사한 형태를 보이는 것을 확인할 수 있는데 이는 동일한 이온에너지가 입사하게 된다면 ion flux 의 양에 따라 etch rate 이 결정되게 된다는 것을 알 수 있다. Etch rate 측정결과를 보면, new grid 의 사용시에 균일도가 더 좋은 것을 예상할 수 있는데 non-uniformity 수치로 conventional grid 와 proposed grid 를 비교해 보면 그림 4.4.9 와 같이 나타낼 수 있다.

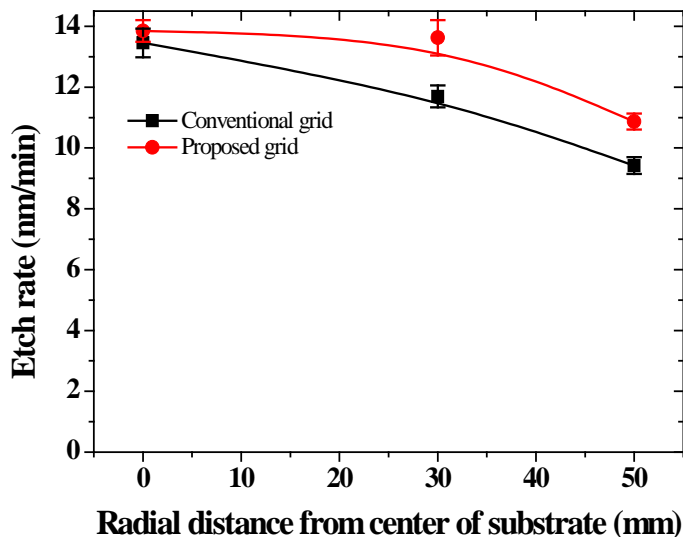


그림 4.4.8 반경 방향 위치에 따른 etch rate 측정 결과

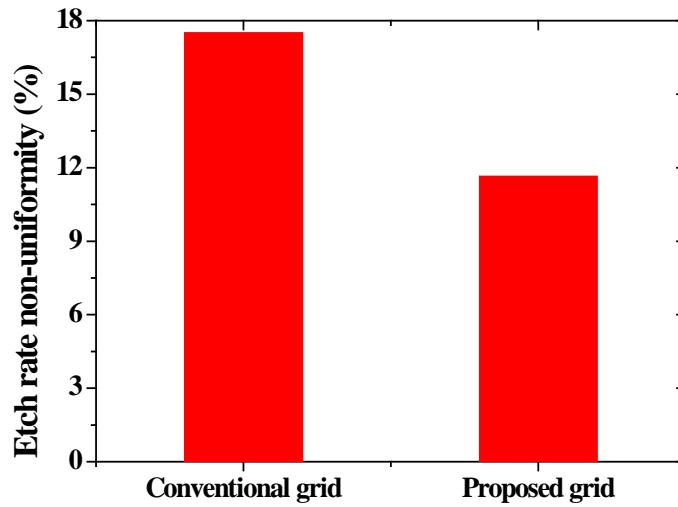


그림 4.4.9 그리드 종류에 따른 etch rate 균일도 수치 비교

Proposed grid 를 사용하게 되면 11.65 % 의 non-uniformity 값이 계산되었고, conventional grid 사용시에는 17.5 % 의 값이 계산되었다. Proposed grid 를 사용할 때 non-uniformity 값이 conventional grid 를 사용할 때 보다 더 낮게 계산되었고 이를 통해 etch rate 균일도가 약 6.5 % 정도 개선되었음을 알 수 있다.

앞 절에서 살펴보았던 ion flux 의 균일도 향상이 식각 결과에도 그대로 적용이 된 것을 확인 할 수 있었다. 절대적인 수치 값이 약간의 차이는 있지만 conventional grid 대비 proposed grid 에서의 수치 향상 폭은 비슷하였다. Proposed grid 를 설계하는 과정에서 물리적인 한계에 부딪혀서 이상적인 설계를 하지 못한 부분은 있었다. 하지만, ion flux 가 적은 영역에서는 구멍의 밀도를 높여준다는 아이디어로 균일도 향상이 가능하다는 것을 보여준 실험 결과라고 볼 수 있다.

## 4.5 요약 및 향후 과제

제 4 장에서는 M-ICP 이온 빔 식각 장치의 균일도 특성에 대하여 살펴보았다. 대면적 공정으로써 양산에 적용하기 위해서는 넓은 면적의 웨이퍼를 식각하였을 때 균일하게 공정처리가 되어야 한다. 하지만, 일반적인 이온 빔 식각 장치의 특성상 그리드를 통과해 기관으로 입사하는 ion beam 의 경우는 그리드 중앙의 density 가 높은 가우시안 분포를 가지게 된다. 따라서 식각 공정을 할 때, 기관 가장자리로 갈수록 etch rate 이 감소하는 현상을 피할 수 없다. 이로 인해 균일도 특성이 매우 좋지 않게 나오게 되며, 이를 향상시키는 목적으로 연구를 진행하였다.

본 연구에 사용된 M-ICP 이온 빔 식각 장치의 경우에서의 source 는 자기장이 인가된 형태이다. 따라서 자기장의 구배에 따른 균일도 특성에 대하여 살펴보려고 하였다. 전자석에 인가하는 전류 조건에 따라 총 네가지 조건 (Case 1 ~ Case 4) 으로 자기장 구배를 만들 수 있었다. 자기장을 인가하지 않은 ICP 경우와 더불어 자기장을 인가한 Case 1 ~ Case 4 에서 반경방향 위치에 따라 플라즈마 밀도 및 전자온도를 측정하였다. Case 2 ~ Case 4 는 그리드 중앙에서 반경방향이 증가함에 따라 자기장이 세기가 증가하는 형태로 자기장 구배가 이뤄져 있는데, 이 경우에서 플라즈마 밀도의 균일도 특성이 가장 우수하였다. 이 세가지 경우는 자기장 기울기만 다른 경우인데 큰 차이를 보이지 않았다. 가장 균일도 특성이 좋지 않은 조건은 Case 1 의 경우로써 반경방향이 증가함에 따라 자기장의 세기가 감소하는 조건이다. Case 1 조건에서 플라즈마 밀도 균일도가 좋지 않은 이유는 플라즈마의 flute instability 현상에 기인한다. Ion beam flux 균일도와 식각 균일도 특성도 Case 2 ~ Case 4 의 경우가 가장 좋다. 반경 방향이 증가함에 따라 자기장의 세기도 역시 증가하는 것이 균일도 특성 향상에 지배적인 역할을 하게 되며, 자기장 기울기의 수치 변화에 따라서는 균일도 특성에 큰 차이가 발생하지 않는 것을 알 수 있다.

자기장 구배의 변화에 따른 균일도 개선에도 한계가 보였다. 따라서 좀 더 균일도를 개선시켜보려고 그리드를 새로 제작하여 실험을 진행하였다. 자기장의 조건은 균일도가 가장 우수한 조건중 하나인 Case 2 조건에서 진행하였으며 그리드 중앙영역보다 가장자리 영역의 그리드 구멍 밀도를 높여서 ion flux를 높이려고 하였다. 그리드 설계에서 물리적인 한계에 부딪혀서 반경방향 위치에 따라 세 영역으로 나눈 후에 영역마다 구멍의 밀도를 다르게 가져갔는데, proposed grid 사용시에 conventional grid 사용할 때 보다 ion flux 균일도가 약 6% 정도 개선되었다. 이 결과는 식각 결과에서도 고스란히 나타나, 절대적인 균일도 수치는 약간 차이가 있지만 etch rate 균일도 측정시에도 conventional grid 대비 proposed grid 에서 균일도가 향상된 수치는 거의 비슷하게 측정되었다. 다만, proposed grid 를 제작할 때 물리적인 가공에 따른 이슈들 때문에 이상적으로 제작하지 못하였다는 문제와 그리드 구멍 변화가 되는 경계점에서는 식각할 수 없다는 문제가 발생하였다. 그리드를 설계할 때, 대면적 공정과 그리드 구멍의 밀도 변화를 미리 고려한다면 밀도가 변하는 boundary 에서도 끊김 없이 식각이 가능하도록 디자인이 가능하다.

자기장의 구배에 변화를 주어 균일도를 개선할 수 있는 부분이 있지만 전반적으로 빔의 가우시안 분포에 따른 불균일 현상을 개선하기에는 한계가 있다. 이를 해결하고자 플라즈마 밀도가 낮은 위치에서는 더 많은 구멍을 뚫어 이온들이 더 많이 기판에 도달할 수 있도록 그리드를 새롭게 디자인 하여 균일도 개선에 크게 기여할 수 있었다.

## 제 5 장 MTJ layer 구성 물질들의 식각 특성

3장과 4장에 M-ICP 이온 빔 식각장치의 기본적인 방전과 균일도 특성에 대하여 자세히 살펴보았다. 본 실험에 사용된 장치를 MTJ layer 식각에 응용하면 기존에 사용되는 RIE etcher 장비와 어떤 차별성이 있으며 특징이 있는지 제 5장에서 살펴보려고 한다.

MTJ layer 는 차세대 뉴 메모리로 개발중인 STT-MRAM 에서 핵심 역할을 하는 layer 로써 STT-MRAM 의 동작원리와 더불어 개발중인 다른 메모리에 대해서 살펴보려고 하겠다. MTJ layer 는 하는 역할을 같지만 구성하는 물질들은 매우 큰 차이가 있다. 이것을 구성하는 물질들에 대한 연구는 지속적으로 진행중이고 소자의 성능을 결정하는 매우 중요한 사안이기 때문에 각 회사에서는 구성물질들의 정확한 정보는 제공하지 않는다. 하지만 기본적인 동작원리는 같기 때문에 dielectric layer 의 위 아래로 metal layer 들을 층층이 쌓여져 있는 구조로 되어 있다. 이 때 구성하는 다양한 물질들의 후보군으로 존재하는데 이에 대하여 식각실험을 하기에 앞서 시뮬레이션으로 sputter yield 를 예측해보았다.

한편, 식각 실험을 위해 line and space 패턴이 된 샘플을 직접 제작하였으며 기존 RIE etcher type 의 식각 장치에서의 식각 특성을 분석해보았다. ICP type 과 M-ICP type 의 source 를 사용하는 식각 장치에서의 식각 특성을 분석함으로써 RIE type etcher 에서의 MTJ layer 식각의 한계를 확인할 수 있었다. 이러한 한계성과 비교분석을 위해 본 연구에서 새로 설계한 M-ICP 이온 빔 식각 장치에서 식각 실험을 하였으며 RIE etcher 를 사용할 때 발생하는 문제점을 M-ICP 이온 빔 식각 장치를 사용함으로써 해결 할 수 있었다.

## 5.1 차세대 뉴 메모리 개발 현황 및 종류

컴퓨터 시스템에서 메모리는 필수불가결한 위치를 담당한다. 그림 5.1.1 과 같은 구조로 시스템은 구성되어 있으며 전자기기가 발달할수록 소형 컴퓨터가 우리 생활 곳곳에 들어와있다. 이에 따라 메모리는 읽고 쓰는 속도가 빠른 것은 물론, 제조비용도 저렴해야 하고 전기가 공급되지 않아도 기억할수 있는 기능이 있어야 하며 고밀도를 구현하여 작은 면적에도 대량의 용량을 저장할 수 있어야 한다. 과거에는 메모리의 역할은 단순히 저장기능만 주로 담당을 해온 반면에 최근에는 여러가지 요소들이 시스템을 구성하는데 계속 요구가 되고 있다. 그러나 이와 같은 모든 요구를 만족하는 이상적인 메모리는 존재하지 않는다. 하나의 장점이 있으면 이에 따르는 단점이 존재하기 마련이고 이를 극복하고자 그림 5.1.2. 와 같이 hierarchy 한 구조로 메모리를 배치하여 사용하고 있다.

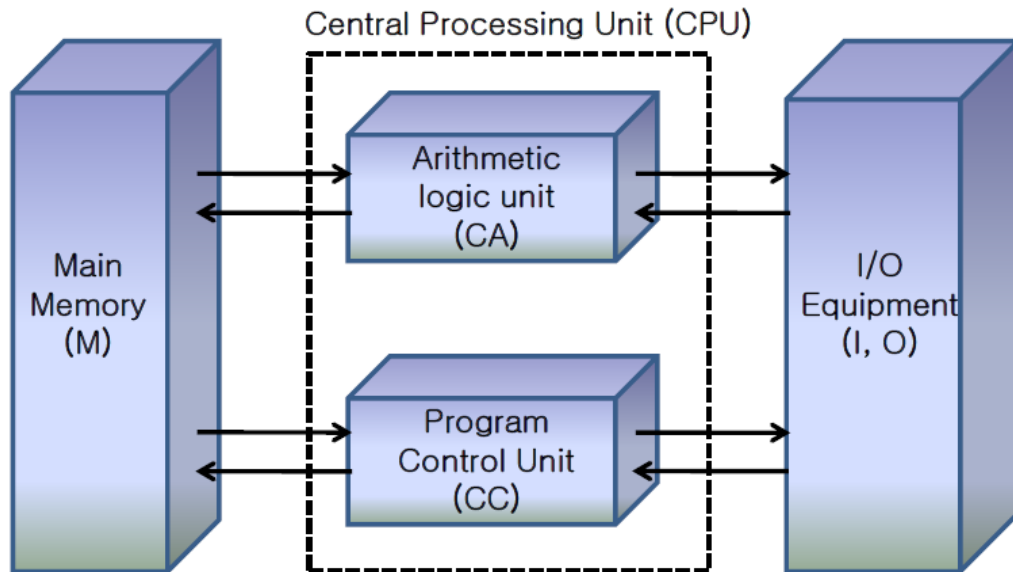


그림 5.1.1 컴퓨터의 구조 [96]

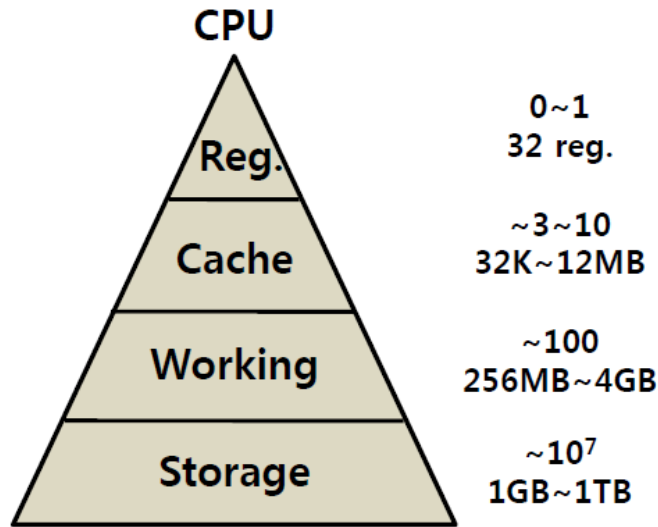


그림 5.1.2 hierarchy 메모리 구조

Cache 위치에는 높은 속도가 요구되기 때문에 낮은 밀도를 가지는 단점에도 불구하고 SRAM 을 사용하고 있다. Working 부분에는 일정수준 이상의 스피드와 밀도를 가지는 DRAM 이 널리 사용되고 있으며 Storage 부분에는 낮은 제조 단가와 높은 밀도를 구현할 수 있는 NAND 가 사용되고 있다. 이처럼 서로 단점이 있음에도 이와 같은 구조로 배치하여 사용에 편리하도록 메모리들은 구성이 되어 있다.

이와 같은 구조를 사용함으로 인해 큰 효율적으로 사용하고 있음에도 불구하고 지속적인 이상적인 메모리에 대한 수요가 요구되고 있다. 전자산업이 발달함에 따라 초소형 전자장치들이 늘어남에 따라 기존에 사용되었던 메모리의 단점들을 보완할 수 있는 차세대 메모리에 대한 연구가 지속되어 오고 있다. 기존에 사용되어오던 메모리와 개발중인 메모리가 그림 5.1.3 에 나타나 있다. 이처럼 현재는 다양한 메모리가 연구 개발 중인데 그 중에서도 phase change random access memory (PRAM), Magnetic random access memory (MRAM) 과 resistive random access memory (ReRAM) 에 대한 연구가 가장 활발하게 이어져오고 있다. PRAM, MRAM 과 ReRAM 각각 구성 물질과 제작방법은 차이가 있지만 비휘

발성 특징을 가지는 공통점이 있다. DRAM 과 flash 메모리들은 전하를 통해 디지털 신호를 구별하는 특징이 있지만 새로 개발중인 메모리들은 전류를 흘려 저항값을 detecting 하여 디지털 신호 '0' '1' 로 구분하는 특징도 있다. 위의 메모리 중에서도 가장 이상적인 메모리 소자로 생각되는 MRAM 에 초점을 맞춰 보고자 한다. MRAM 은 conventional MRM 이 있고 Spin Transfer Torque (STT) MRAM 이 있는데 cell 면적이 작고 작은 전류 신호로써 동작이 용이한 STT-MRAM 이 보다 더 각광받고 연구가 활발히 진행되고 있다. 다음 챕터에서는 STT-MRAM 의 기본적인 동작원리와 특징에 대해 자세히 살펴보도록 하겠다.

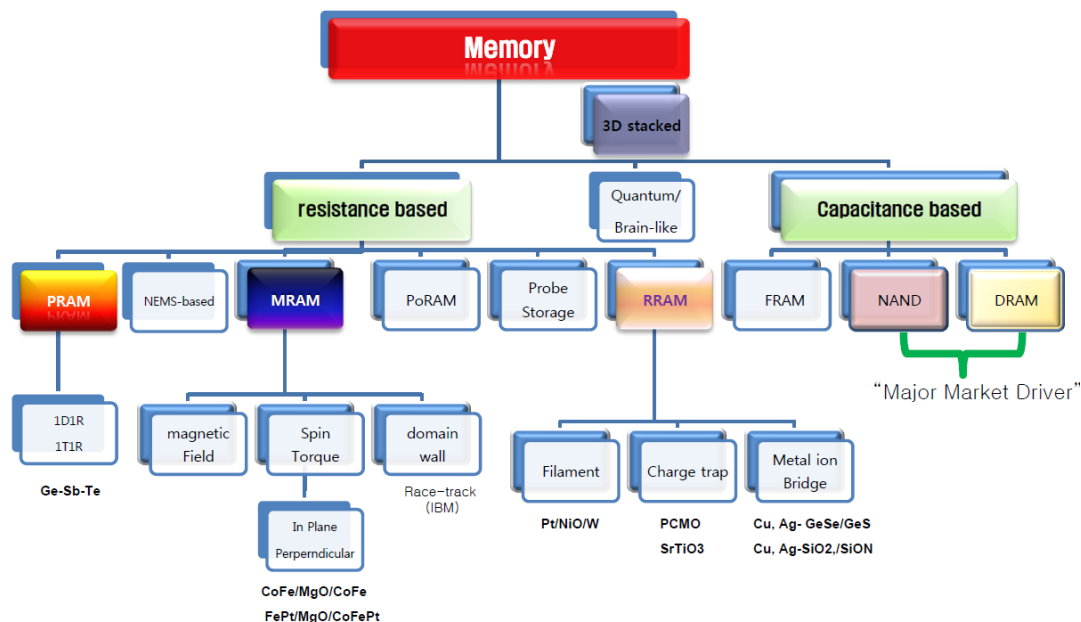


그림 5.1.3 다양한 메모리 종류



## 5.2 STT-MRAM 의 구조 및 동작 원리

기본 적은 STT-MRAM 의 구조는 그림 5.2.1 와 같이 나타낼 수 있다. 신호를 읽고 쓰는 역할은 bit-line 과 word-line 을 통해 이뤄지며 digit-line 이 요구되지 않아 간단한 cell 구조로 이루어져 있다. 이때 핵심 역할을 하는 부분이 MTJ layer 이다. MTJ layer 는 dielectric layer 의 위아래로 자성을 띄는 layer 가 있는데 이를 pinned layer와 free layer 로 불리게 된다. 이 물질에 전류가 흐르게 되면 자기장이 방향이 바뀌게 되고 이때 바뀌는 방향에 따라 저항값이 변하게 된다[97-100]. 저항값의 변화에 따라 디지털 신호인 ‘0과 ‘1’로써 인식할 수 있다. 저항이 변화할 때 가장 클 경우와 가장 작을경우의 차이가 클수록 디지털 시그널로 확실하게 인식이 가능할 것이다. 이때 얼마만큼 확실하게 구분을 해주는지 신뢰도의 척도가 tunneling magnetoresistance (TMR) ratio 이다. 이 비율이 크면 클수록 소자의 신뢰성이 높아진다고 볼 수 있으며, 이것은 MTJ layer 를 구성하는 물질들의 종류와 구성 방식에 따라 좌우된다[101-103]. 이에 대한 것들에 대한 것은 상당한 전문적인 지식이 필요로 하고 TMR ratio 의 개선에 대한 연구만 해도 상당히 심도 있게 진행되고 있으므로 자세한 내용은 생략하도록 한다.

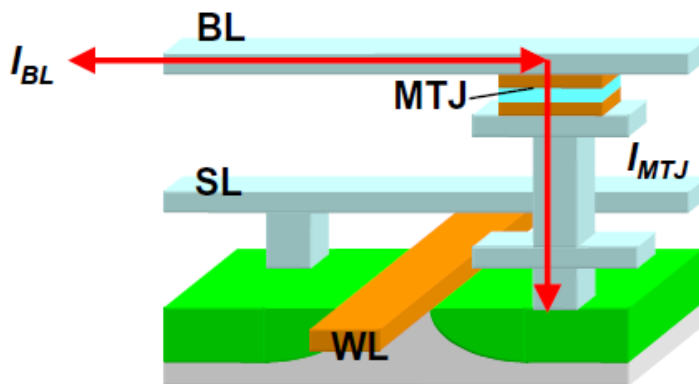


그림 5.2.1 STT-MRAM 의 기본적인 구조 [97]

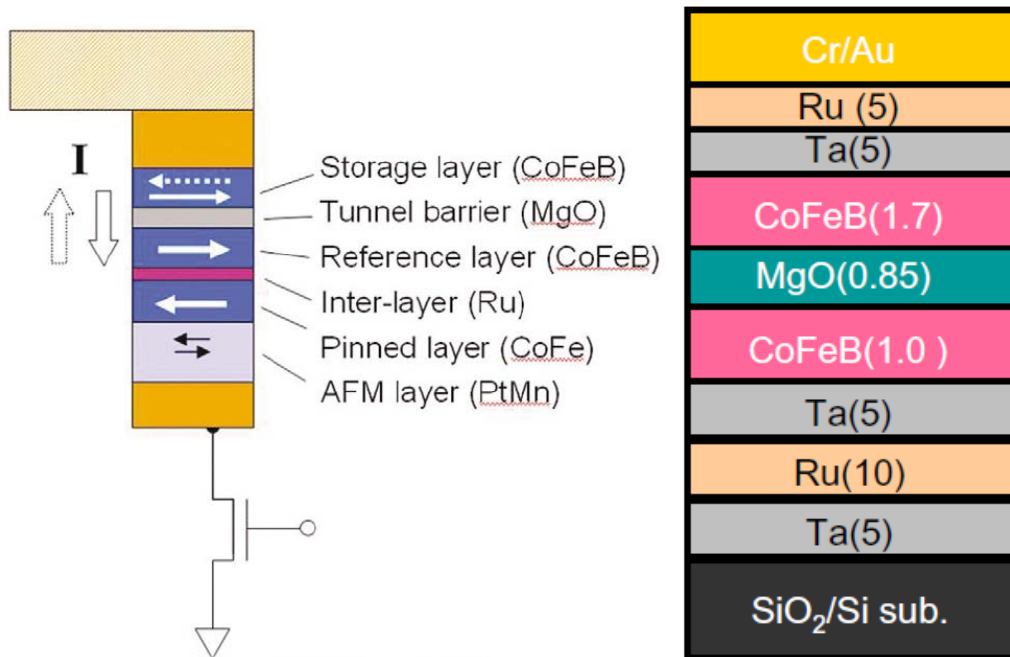


그림 5.2.2 MTJ layer 구성물질 [97][98]

MTJ layer 는 그림 5.2.2와 같이 다양한 물질들로써 구성되어 있다. MTJ layer 의 구성물질들은 정형화된 틀은 없고 물질종류와 다양한 물질을 쌓는 순서등이 해당 소자의 성능을 좌우하기 때문에 이에 대해 재료적인 측면에서 다양하게 연구가 진행되고 있다. 다만, tunneling barrier 역할을 하는 dielectric layer 를 사이에 두고 metal 물질들이 쌓여있는 형태는 모두 동일하게 사용을 하고 있고 CoFeB 와 같은 물질들은 널리 사용되어 연구가 진행중이다. 일반적으로는 dielectric layer 가 하나인 구조인 STT-MRAM 소자에 대한 연구가 많이 진행되고 있지만 최근에는 dielectric layer 를 두개를 넣어 MTJ layer 의 집적도를 높이는 연구도 진행되고 있다[100]. 일반적으로 하나의 dielectric layer 를 넣게 되면 디지털 시그널을 ‘0’과 ‘1’의 두개만 인식이 가능하지만 그림 5.2.3 과 같은 형태로 MTJ layer 를 구성하게 되면 총 네 개의 신호를 구분 할 수 있게 되는데, 이 때 가장 중요시 되는 것이 얼마만큼 신호를 신뢰성 있게 구분할 수 있는 것인가에 대한 이슈이다. Cell 의 집적도를 높일 수 있는 방법으로는 유효

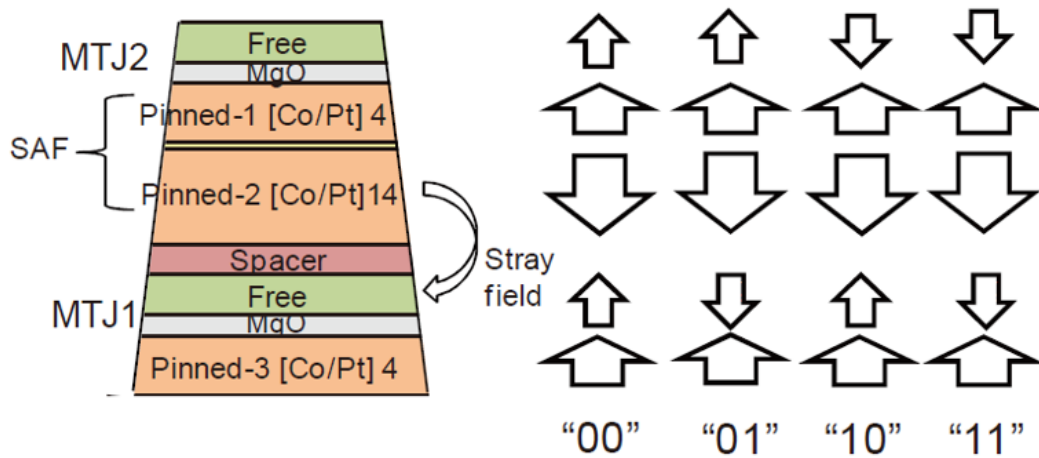


그림 5.2.3 멀티 레벨 신호를 가지는 MTJ layer 구조[104]

하지만 신호를 명확하게 구분할 수 없다면 올바르게 동작하는 소자로써 사용하지 못할 것이기 때문에 이 경우에도 역시 TMR ratio의 중요성이 극대화된다.

STT-MRAM은 이상적인 메모리 소자로써 여겨짐에도 불구하고 아직까지 양산화가 되지 않는 이유들이 있다. 재료적인 측면과 공정적인 측면에서 크게 나눌 수 있는데, 재료적인 측면은 얼마만큼 높은 TMR ratio를 확보하여 보다가 소자의 신뢰성을 높일 수 있는 것인지에 대한 이슈이다. MTJ layer를 구성하는 물질들에 변화를 줌으로써 메모리 소자의 읽고 쓰는 속도는 물론이거니와 소자의 파워소비 측면, 소자의 endurance, 소자의 신뢰성 등의 특징들을 개선할 수 있다. 그렇기 때문에 이에 대해 많은 연구가 진행되고 있다. 공정적인 측면, 특히 식각에서도 큰 이슈가 있다. MTJ layer는 여러가지 금속 물질들로 구성이 되어 있는데 구성물질들을 예로 들면 CoFeB, Ru, Ta, TiN, FePt, PtMn, CoFe 등이 있고 dielectric layer로는 MgO가 많이 사용되고 있다. 이러한 다양한 물질들의 특징은 RIE etcher에서 식각 하였을 경우 식각 후에 volatile하게 날라가지 않는 문제가 있다. MTJ layer는 dielectric layer를 사이에 두고 metal

층이 있는 형태인데 식각후에 생기는 byproducts 들이 MTJ layer 측면에 붙는 현상이 발생하게 된다. 이로 인해 절연 역할을 해야 하는 MgO layer 가 제대로 된 역할을 하지 못하고 위아래 metal layer 가 short 이 되는 문제가 발생하게 된다. 이와 같은 현상이 발생하게 되면 소자는 정상적으로 동작하지 못하게 되는 것이다.

재료적인 측면에서 상당히 개선하여 완성도 높은 구조를 만들었을지라도 공정이 원활하게 되지 않으면 소자는 만들어 질 수 없다. 물론, 이와 같은 특성을 가지는 소자를 하나만 만드는 것은 큰 어려움이 없겠지만 대면적에서 높은 밀도를 가지는 MTJ layer 를 식각에는 큰 어려움이 따르고 있는 상황이다. 이에 대한 식각 공정에서의 이슈를 해결하기 위해 많은 연구가 진행되어 왔다. 일반적인 식각 가스로는 식각이 원활하게 되지 않아 식각 가스를 다양하게 변화를 주는 연구도 진행되어 왔고 이와 더불어 일반적인 RIE type etcher 가 아닌 IBE 를 이용한 식각연구도 많이 진행되고 있다. 다음 챕터에서는 MTJ layer 를 구성하는 물질들 및 MTJ layer 식각에 대한 선행연구에 대하여 자세히 살펴 보도록 하겠다.

### 5.3 MTJ layer 식각 선행 연구

일반적으로 MTJ layer 식각은 식각 장비에 따라 RIE etcher 에서 식각을 하는 것과 IBE 에서 식각을 하는것으로 크게 나눌 수 있다. 식각 하는 장비에 따라 분류하는 것은 식각하는 원리에 따라 나누는 것이라 할 수 있다. 일반적인 RIE type 의 플라즈마 식각장치 에서는 그림 5.3.1 과 같이 다양한 원리에 의해 식각이 일어나게 된다. RIE 에서는 플라즈마를 방전시켜 sheath voltage 로 식각을 진행하기 때문에 이와 같은 다양한 모든 현상이 일어나는 반면에 IBE 에서는 그리드를 통해 통과하는 ion 에 의해 physical 한 sputter etching 만 일어난게 된다[104]. 각각의 장단점이 있기 때문에 선행연구된 논문들은 RIE 와 IBE 에서 실험한 두가지 형태로 많이 보고가 되어져 왔다. 또한 식각 하는 물질의 종류에 따라 나뉘기도 하며, MTJ layer 를 구성하는 다양한 물질들을 식각하느냐 혹은 완성된 MTJ layer를 식각하느냐에 따라 나뉘기도 한다.

우선 RIE type 에서 진행된 연구들을 살펴보고자 한다. RIE type 에서 식각한 연구들은 식각 물질들을 thin film 으로 적층한 후에 식각 특성에 대한 연구들이 많이 진행되어왔다. 그림 5.3.2 은 CoFeB 와 TiN 을 thin film형태로 적층 후,

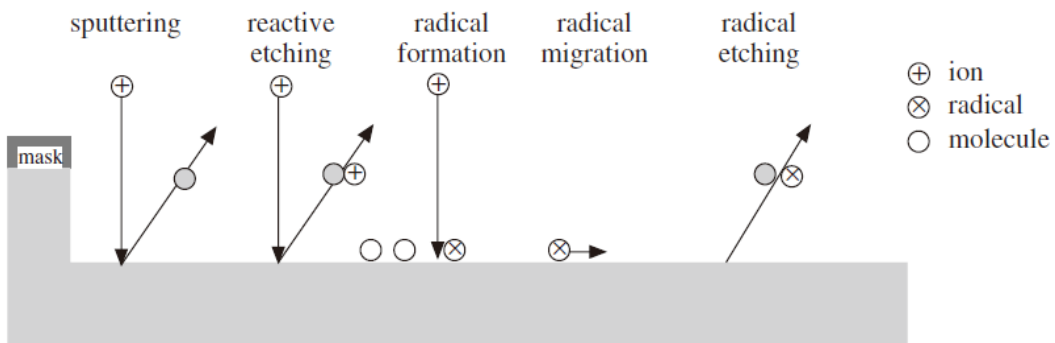


그림 5.3.1 RIE type etcher에서 일어나는 다양한 식각 원리[105]

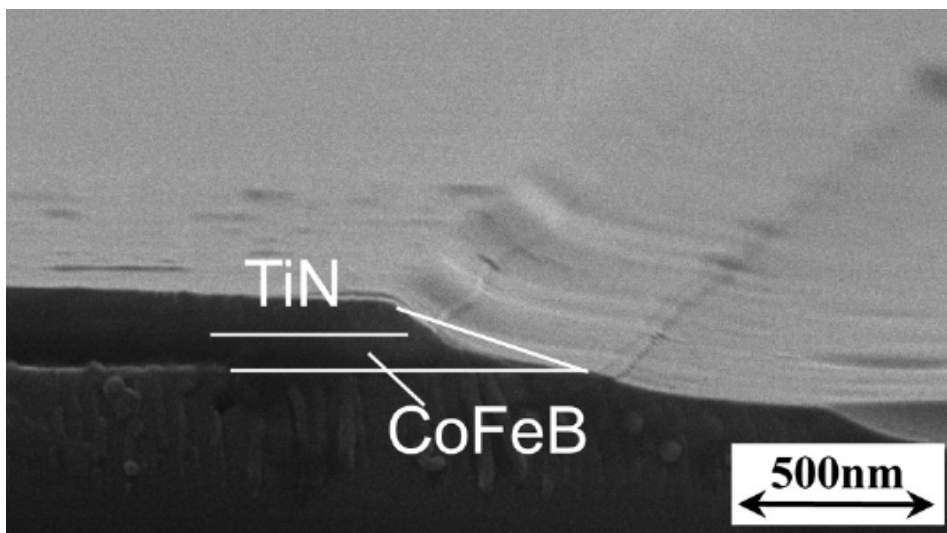


그림 5.3.2 CoFeB 와 TiN 을 thin film 형태로 적층 후 식각한 모습[106]

$\text{H}_2\text{O}+\text{CH}_4+\text{Ar}$  혼합가스 플라즈마로 식각한 연구이다[105]. 혼합 가스의 비율에 변화를 주어 물질의 식각 특성에 대한 선행연구이다. 이와 더불어 화학적인 chemical 반응에 의한 성분 변화를 분석하기 위해 XPS 결과도 같이 진행되었다. 이와 비슷한 형태인 thin film 형태로 적층하여 FePt 물질에 대한 식각 특성 연구도 진행된 바 있다[107].

금속 물질뿐만 아니라 dielectric layer 를 이루는 MgO 에 대해서도 자세한 식각 특성 연구가 진행되었다[108]. 금속 물질이 MTJ layer 옆면에 붙게 되는 문제가 가장 부각되고 있지만 금속 층 사이에 들어가는 절연층에 대한 식각특성 연구도 게을리 될 수 없는 부분이기 때문이다. 이에 대한 실험도 역시 thin film 형태로 제작 되었으며  $\text{CH}_3\text{OH}$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{Cl}_2$  등을 Ar 과 혼합하여 식각 특성 분석을 하였다. 주로 가스 혼합 비율을 바꿀 때 생기는 식각 특성 변화에 대해 연구가 진행되었다. 이처럼 RIE etcher 에서 식각한 연구들의 초기에는 식각 샘플이 주로 thin film 형태로 제작 되어 MTJ layer 를 이루는 물질들에 대한 기본적인 식각 특성에 대해 살펴보았다. 그 후에는 위의 실험에서 얻은 적절한 혼합가스 비율을 이용하여 완성된 MTJ layer 식각 한 후 TEM 분석까지 진행하

였다[109,110]. 하지만 이러한 혼합 가스를 이용한 RIE type etcher 에서의 식각은 STT-MRAM 소자에 데미지를 줄 수 있다는 연구도 보고된 바 있다[111]. 혼합가스를 사용하지 않고 순수한 Ar 플라즈마를 이용하여 식각하게 되면 그림 5.3.3 와 같이 MTJ layer 구성하는 물질들이 volatile 하게 날라가지 않고 패턴 아래 측벽에 붙는 현상이 생기게 된다.

RIE etcher 에서 MTJ layer를 식각하게 되면 위와 같은 문제점이 발생할 수 있다. 이를 해결하고자 ion beam etcher (IBE) 에서 MTJ layer 를 식각하는 연구가 진행되어져 왔다. MTJ layer 를 구성하는 물질들에 대한 식각특성연구는 주로 RIE 에서 진행되어져 온 반면, MTJ layer 를 식각하는 연구는 IBE 에서 많이 연구가 되어져 왔다. 앞서 언급한 바와 같이 MTJ layer 가 volatile 하게 식각되지 않는 물질들로 구성되어 있는 것과 패턴의 측면에 re-deposition 이 되어서 소자의 성능을 저해 하는 요인으로 인해, physical 하게 sputter etching 을 하는 IBE 의 필요성이 대두된 것이다. IBE 는 ion 들의 physical 한 sputter etching 을 하는 원리 로 식각하게 되며, 이온 에너지를 control 할 수 있고 식각 패턴이 놓여진 기판을 tilt 함으로써 입사되는 ion 들의 입사각 또한 control 할 수 있다. 이러한 장점들로 인하여 MTJ 식각에서 유리한 방법으로 접근을 할 수 있

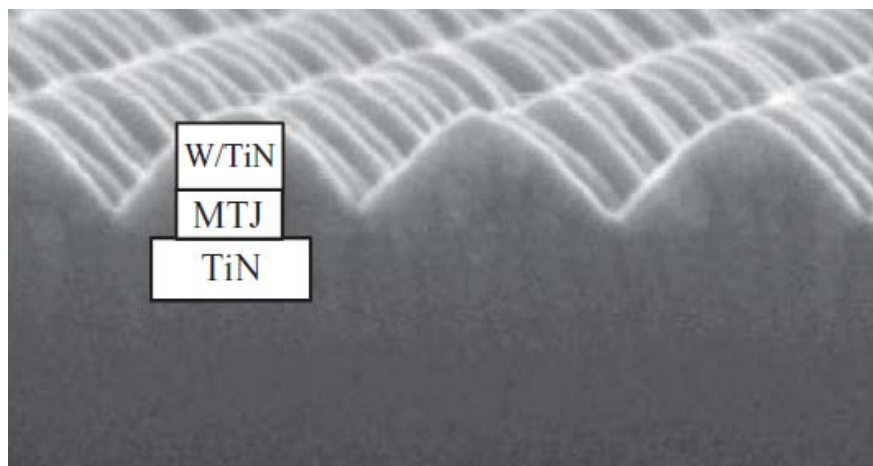


그림 5.3.3 순수한 Ar 플라즈마로 RIE etcher 에서 식각 후 모습 [110]

고 IBE를 이용한 MTJ layer 식각에 대한 연구들이 진행되어져 왔다[63-66]. RIE와 IBE에서 식각한 후를 각각 비교에 대한 연구도 진행되었으며[112] IBE를 사용하더라도 기판을 tilt 하는 것과 하지 않는 것에 대한 차이에 대한 것과 tilt 해서 식각 할 경우, 단계적으로 tilt 각도를 변화하면 MTJ layer 측면에 재증착된 물질들을 제거하고 profile을 하나의 각도로 tilt 해서 식각할때보다 더 vertical 하게 된다는 연구도 진행된 바 있다[64]. 기판 tilt 유무에 따른 profile의 차이가 그림 5.3.4에 나타나 있다.

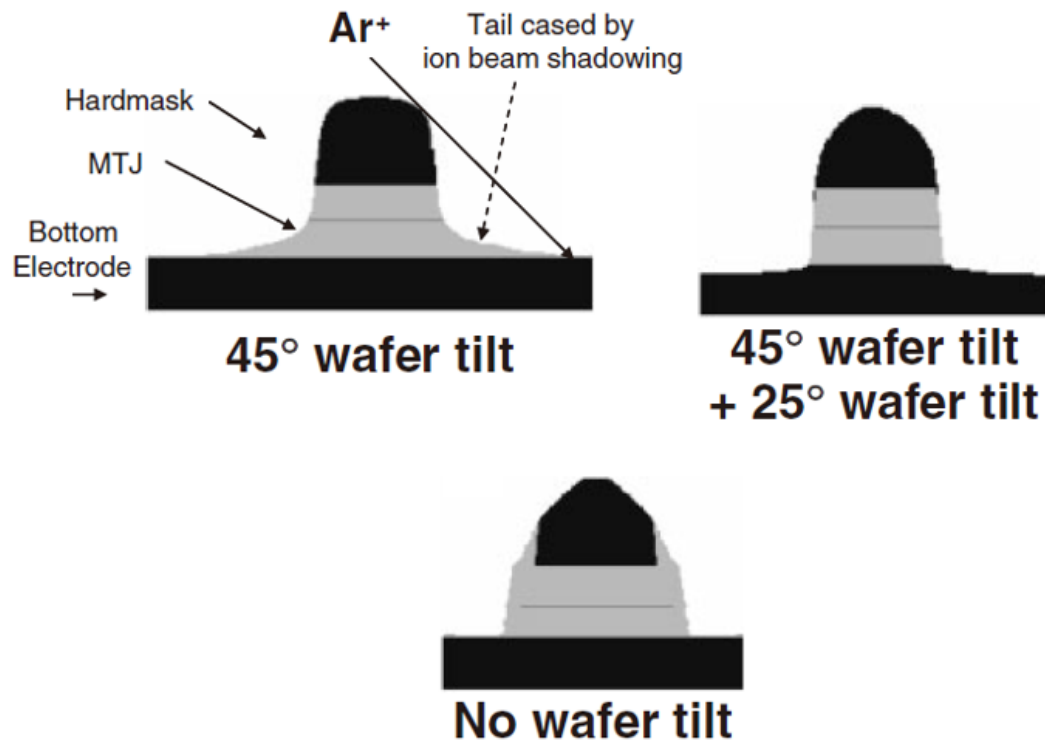


그림 5.3.4 기판 tilt에 따른 식각 후 profile의 차이[64]



## 5.4 Sputter yield 시뮬레이션

선행 연구에서 살펴본 바와 같이 MTJ layer 를 구성하는 물질들에 대한 식각 특성에 대한 연구와 MTJ layer 식각에 대한 연구는 RIE type 에서 식각하는 경우와 IBE 에서 식각하는 경우로 나뉠 수 있다. 최근 추세는 RIE type 에서 식각하는 것에 한계를 느끼고 있어 IBE 에서 연구가 많이 진행되고 있기 때문에 sputter etching 에 대한 이해가 필요하며 이와 더불어 각 물질들마다 sputter yield 가 존재하기에 이에 대한 연구도 필요하다. 따라서 여러 물질들을 식각하기에 앞서 무료 배포용 시뮬레이션인 The Stopping and Range of Ions in Matter (SRIM) 을 이용하여 sputter yield 를 측정해 보았다[113].

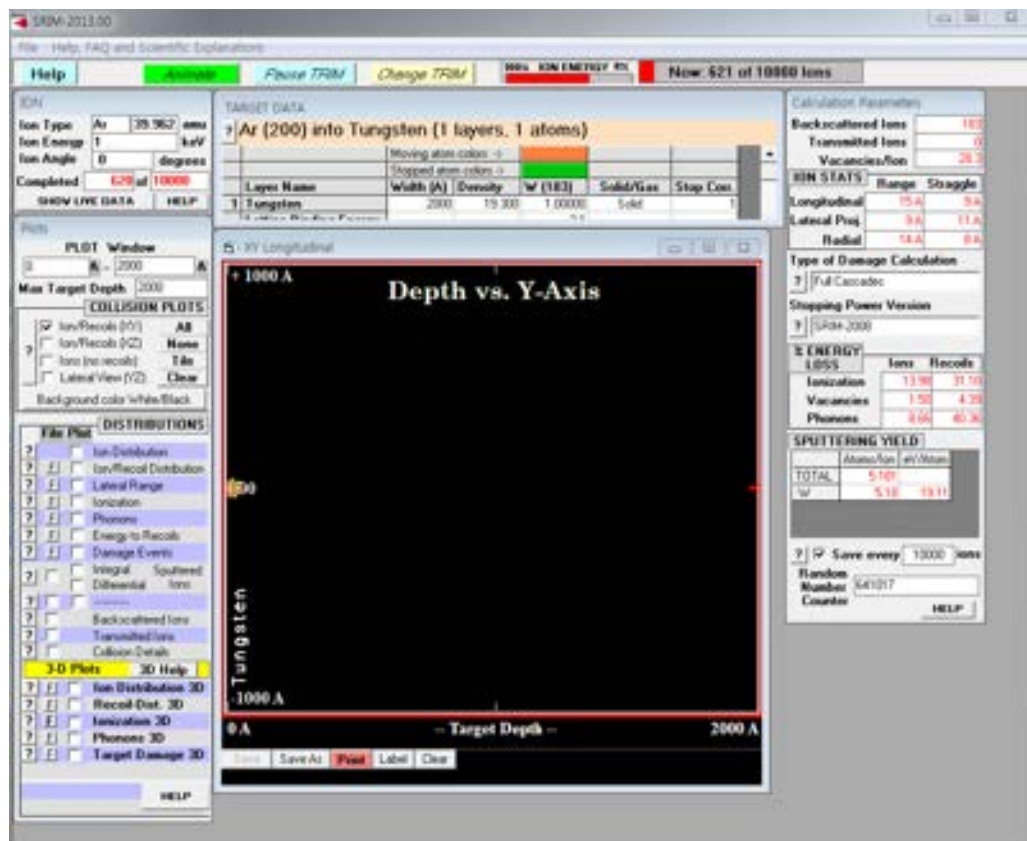


그림 5.4.1 SRIM 시뮬레이션이 실행된 모습

그림 5.4.1 은 SRIM 시뮬레이션이 실행된 모습이다. Sputter yield 를 측정할 때에는 반드시 ion 의 입사각에 의한 정보가 들어가야만 한다. 입사각의 차이에 따라 sputter yield 도 큰 차이를 보이기 때문이다. 따라서 시뮬레이션도 여러 물질에 대한 sputter yield 를 측정하도록 하되, 입사각에 대한 의존성에 대하여 시뮬레이션을 실행하였다. 또한 이온들이 입사하는 각도 뿐만 아니라 이온 에너지에 따라서도 큰 차이를 보이기 때문에 이에 대해서도 시뮬레이션을 진행하였다. 총 12가지 물질들에 대해 시뮬레이션을 진행하였는데 그 물질들은  $\text{SiO}_2$ , Ta, CoFeB, W, TiN,  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , IrMn, PtMn, NiFe, CoFe, Ru,  $\text{WO}_3$  로써 MTJ layer 를 구성하는 대표적인 물질들이라고 할 수 있다. 이온들의 입사 에너지는 100eV, 500eV, 1000eV, 의 세가지 경우를 모두 살펴보았다. 시뮬레이션 후 그래프로 결과를 나타낸 것은 그림 5.4.2 ~ 5.4.7 과 같다. 전체적인 물질들의 일반적인 경향은 입사각의 변화에 따라 sputter yield maximum 값이 존재한다. Dielectric 물질들은 이온 에너지가 낮아도 maximum peak 가 뚜렷하지만, 금속물질들은 그렇지 않다. 금속물질들은 이온 에너지가 낮으면 입사각이 증가를 하더라도 sputter yield 에 큰 변화가 없다. 그러나 metal 물질과 dielectric 물질 모두 공통적으로 에너지가 커지게 되면 동일하게 sputter yield 의 maximum peak 가 생기게 된다. 또한 특징적인 것은 입사 에너지가 커짐에 따라 sputter yield 의 maximum 값이 점차 오른쪽으로 shift 하게 된다. 이 현상은 각각의 물질들마다 약간의 차이는 있을 수 있으나 전체적인 경향은 같다고 볼 수 있다. 에너지에 따른 maximum peak 의 이동현상은 패턴에 식각 후 생기는 facet 의 각도와 상관성이 있는데 이에 대해서는 5.6 절에서 자세히 살펴보도록 하겠다. 약 70~80도 정도의 입사각을 가지게 되면  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Si}_3\text{N}_4$ ,  $\text{WO}_3$  과 같은 dielectric 물질의 sputter yield 가 다른 금속들 보다 월등히 높다는 것을 알 수 있다. 이처럼 입사각의 차이에 따라 sputter yield 의 차이가 생기는 것은 추후에 각 물질사이의 선택비를 개선할 때 사용이 될 수 있을 것이다.

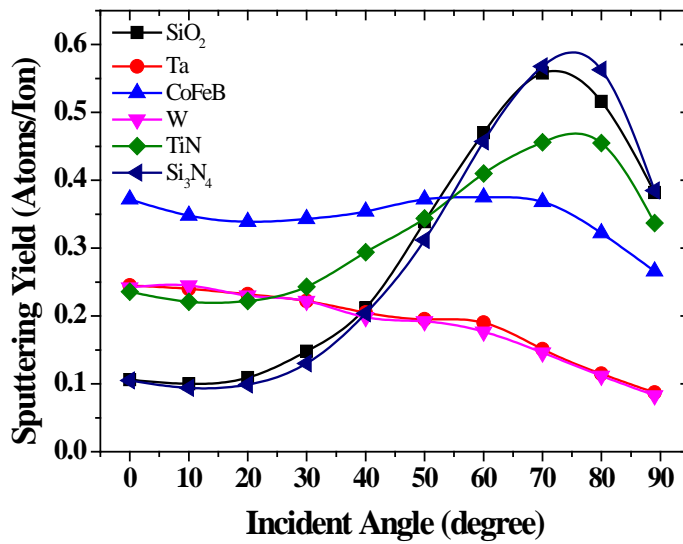


그림 5.4.2 입사각에 따른 다양한 물질들의 sputter yield (100eV)

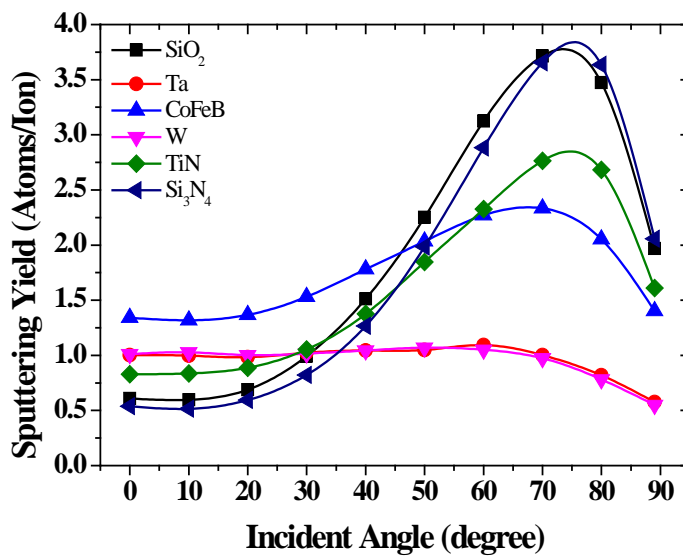


그림 5.4.3 입사각에 따른 다양한 물질들의 sputter yield (500eV)

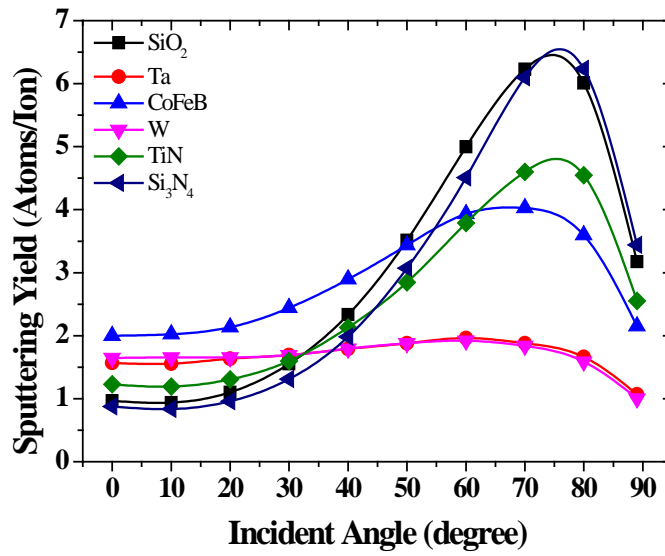


그림 5.4.4 입사각에 따른 다양한 물질들의 sputter yield (1000eV)

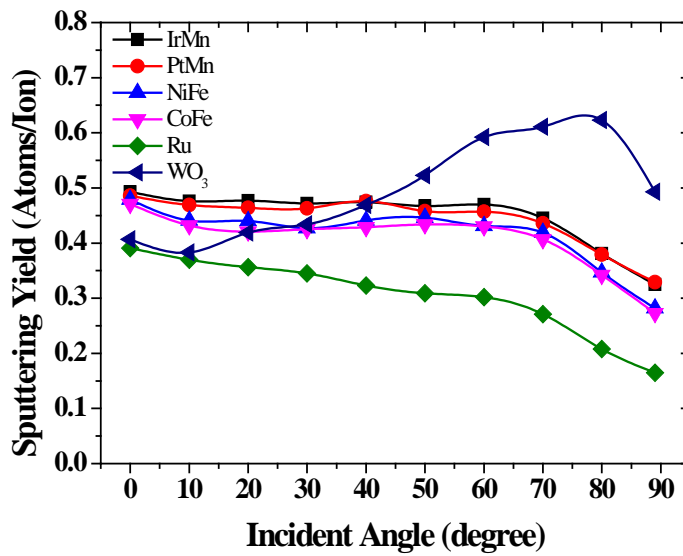


그림 5.4.5 입사각에 따른 다양한 금속 물질들의 sputter yield (100eV)

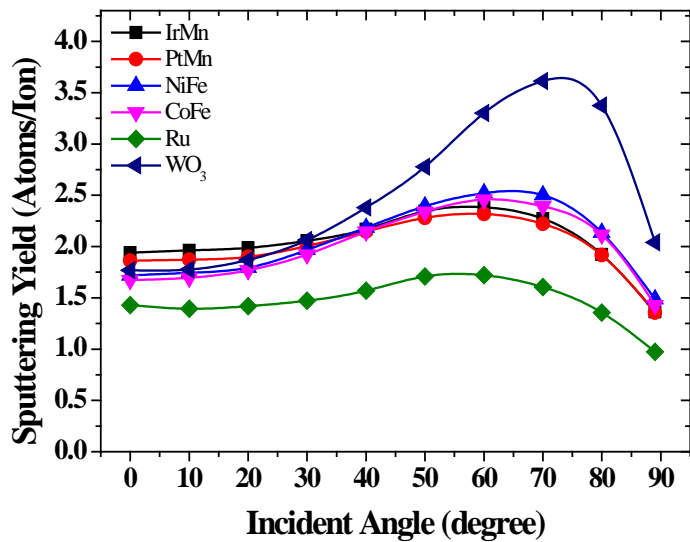


그림 5.4.6 입사각에 따른 다양한 금속 물질들의 sputter yield (500eV)

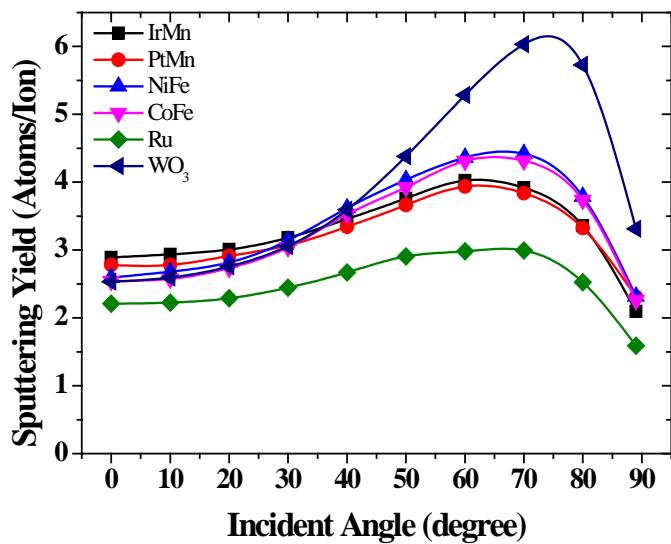


그림 5.4.7 입사각에 따른 다양한 금속 물질들의 sputter yield (1000eV)

하지만, 일반적인 RIE type etcher 에서는 입사각은 제로 이기 때문에 입사각에 따른 sputter yield function 을 응용하기 어려운 측면이 있다. 다양한 물질들의 입사각에 따른 sputter yield 를 살펴보았는데, 이는 에너지에도 의존하지만 입사되는 이온의 갯수에 따라서 변하기 때문에 이 시뮬레이션 결과가 절대적으로 식각 결과와 일치 시킬 수는 없다. 그러나 각 물질들마다 고유한 특성이라고 할 수 있는 입사 에너지와 입사각에 따른 각 물질들의 sputter yield function 을 대략적으로 볼 수 있었으며 식각 실험에 충분히 참고할 만한 것이기에 여기에서 의의를 찾을 수 있을 것이다.

시뮬레이션을 실행한 모든 물질들에 대해서 식각 특성에 대해 살펴보기는 어려운 부분이 있다. 시뮬레이션으로 실행한 총 12가지 물질들이 MTJ layer 를 구성하는 물질들 중 하나이긴 하지만 재료를 모두 구하는 것에 어려움이 따르기 때문이다. 따라서 MTJ layer 를 구성하는 가장 중요한 물질이라고 할 수 있는 CoFeB 의 식각 특성과 더불어 Ta, TiN, W, SiO<sub>2</sub> 의 식각 특성에 대해서 살펴보고자 한다. 우선, 식각에 필요한 sample 을 만들어야만 하기 때문에 샘플을 제작하는 과정에 대해 간략하게 다음 챕터에서 살펴보도록 하겠다.

## 5.5 식각 실험에 사용된 line pattern 샘플 제작

MTJ layer 를 구성하는 물질들의 식각 특성을 살펴보기 위해 식각 샘플을 제작 하였다. 여러가지 물질 중에서도 CoFeB, W, TiN, Ta, SiO<sub>2</sub> 의 식각 특성을 살펴보기 위해 하드마스크는 SiO<sub>2</sub> 를 사용하고 식각되는 물질은 CoFeB, W, TiN, Ta, 인 line and space 패턴을 만들어보았다.

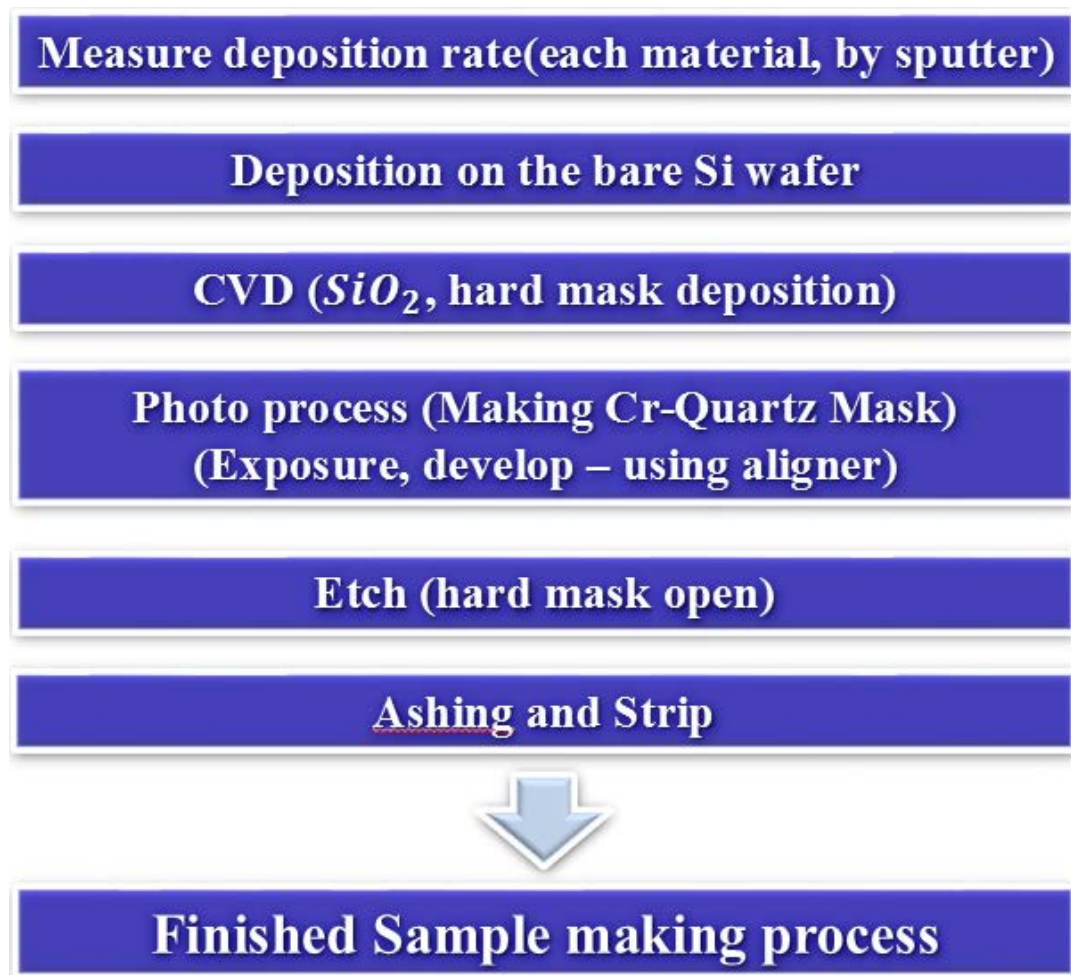


그림 5.5.1 Line pattern 샘플 제작하는 과정

해당 금속 물질들은 bare wafer 위에 sputter 장비를 이용하여 deposition 하고 자 각각의 물질들을 target 을 준비하였다. 하지만 CoFeB 는 조성 비율에 따라 특성이 다르게 측정되므로 가장 우수한 특성을 보이고 있다고 연구된 논문 [114]을 참고하여 CoFeB (56/24/20) 조성비를 가지는 target 을 주문제작 하였다. 각각의 물질들의 target 준비한 후 우선 sputter 장비에서 각 물질들의 deposition rate 을 측정한 후 bare Si wafer 위에 약 500nm 를 증착하였다. 그 후에 하드마스크로 사용될 SiO<sub>2</sub> 를 chemical vapor deposition (CVD) 로 약 500nm 증착한 후 photo 공정을 진행하였다. 그 후에 금속물질을 식각하기 위해 하드 마스크 인 SiO<sub>2</sub> 를 etch 하여 line and space 패턴을 만들었다. 최종적으로 ashing 과 strip 공정으로 SiO<sub>2</sub> 위에 남아있는 PR 을 제거하였다. 이와 같은 절차는 그림 5.5.1 에 간단하게 나타나 있다. 그림 5.5.2 는 위와 같은 절차로 만들어진 완성된 wafer 의 모습이다.

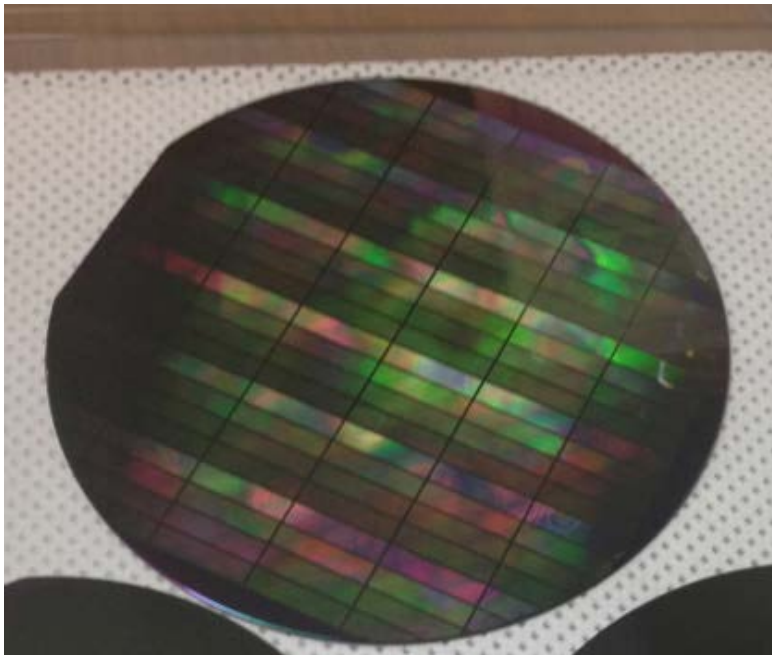


그림 5.5.2 Line pattern 샘플의 완성된 모습



## 5.6 ICP 및 M-ICP 플라즈마 식각 장치의 식각 특성

### 5.6.1 Facet 형성과 redeposition 의 관계

RIE type 플라즈마 식각 장치에서의 식각 특성을 분석하기에 앞서 facet 과 sidewall redeposition 의 관계를 살펴 보고자 한다. 식각 공정에서 Facet 이란 line and space 패턴이 있을 때, 그림 5.6.1 과 같이 처음에는 rectangular 마스크가 있지만 식각 후 mask 에 사선으로 생기는 면을 지칭한다. 또한 그림 5.6.2 와 같이 여러 식각 조건에 따라 facet 의 형태와 각도도 다르게 형성된다[115-119].

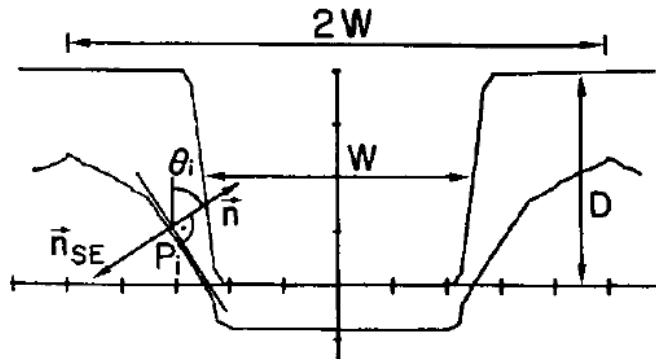


그림 5.6.1 식각 후 생기는 facet formation [115]

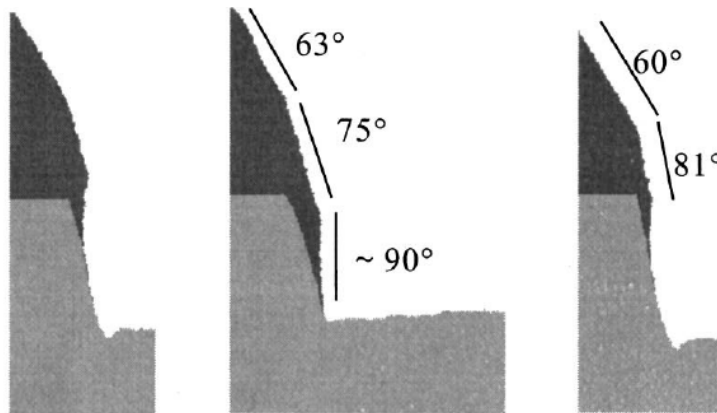


그림 5.6.2 식각 후 생기는 다양한 facet 형태 및 각도 [116]

식각 후에 생기는 facet 각도는 입사각 변화에 따른 sputter yield function 에 의해 결정 될 수 있는데, 형성되는 과정을 간단하게 살펴보면 그림 5.6.3 과 같다. 식각 하기 전에는 수직인 mask 이지만 식각이 진행됨에 따라 mask 의 edge 부분이 식각되어 약간의 각도가 생기게 되는데 이에 따라 모서리 부분이 생김에 따라 sputter yield 가 증가하게 된다. 모서리 부분의 sputter yield 가 점차 증가하다가 최종적으로는 sputter yield 가 최대가 되는  $\theta_{max}$  에 수렴하게 된다. 이와 같은 원리에 의해서도 facet 의 각도는 영향을 받게 되는데, 이 현상을 5.4 절에서 살펴본 sputter yield simulation 결과와 연관시켜보면, 이온 에너지가 커질수록 facet 각도는 점차 증가 할 것이라고 예측할 수 있다. Sputter yield simulation 결과에 따르면, 이온 에너지가 커짐에 따라 sputter yield 의 maximum 이 되는 입사각이 점차 커지기 때문이다.

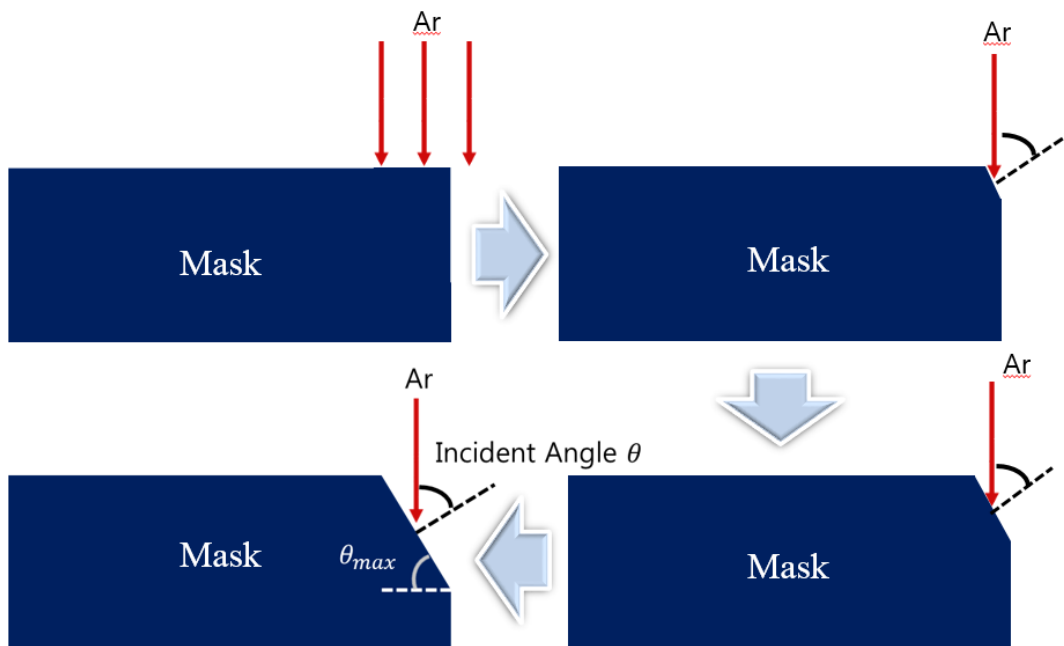


그림 5.6.3 Facet 형성과정

Facet 의 각도는 식각 과정에서 패턴의 profile 에 영향을 미치는데, 특히 side wall redeposition 에도 큰 영향을 미치게 된다. Redeposition 이란 패턴의 측면에 식각 후에 생기는 by-products 들이 붙는 현상으로써 크게 두 가지로 나눌 수 있다. 식각되는 물질이 식각 후에 volatile 하게 패턴 밖으로 날아가지 않고 패턴 측면에 붙는 현상과 그림 5.6.4 와 같이 마스크에서 식각된 물질이 반대편 패턴의 측면에 붙는 현상이다. Facet 이 생긴 마스크에서 식각된 물질이 반대편에 붙는 현상은 이온의 입사각에 따라 sputtered atom 들의 생기는 양과 분포가 다르기 때문이다[120]. 입사각에 따른 sputtered atom 들의 분포는 그림 5.6.5 에 자세히 나와있다. 입사각이 10도에서 60도 까지 변화할 경우 분포가 나와있는데 sputtered atom 들이 주로 생기는 방향뿐만 아니라 양도 다른 것을 알 수 있는데, 양이 다른 것은 앞서 살펴본 바와 같이 입사각에 따라 sputter yield 값이 다르기 때문이다. 그렇기 때문에 그림 5.6.5 에서 입사각이 60 도 일 경우가 sputtered atom 들이 가장 많은 것을 확인 할 수 있다. 이와 같은 입사각에 따라 생기는 sputtered atom 들의 분포를 마스크에 생기는 facet 에 그대로 대입해서 생각해 볼 수 있다. Mask 에 생기는 facet 각도가 상이할 경우 이온들의 입사각에도 큰 차이를 보이게 되며 이로 인해, sputtered atom 들의 분포에 큰 차이를 가져온다. Facet 각도가 높게 되면 패턴의 반대편 측면으로 byproducts 들이 많이 붙에 될 것이며 각도가 낮다면 반대편 패턴의 측면

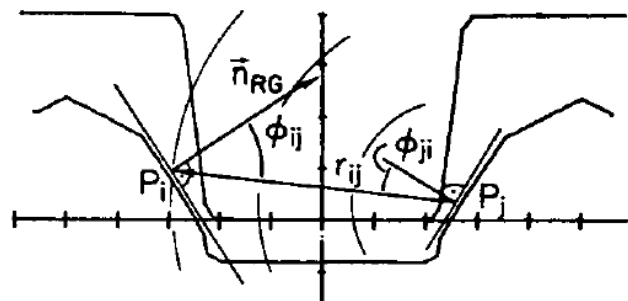


그림 5.6.4 Facet 을 가지는 mask 로 인해 생기는 byproduct 궤적 [115]

보다는 그 위쪽으로 byproducts 들이 많이 분포 될 것이다. 이는 결국 최종적으로 side wall redeposition 에 큰 차이를 가져오게 되며 facet 각도는 낮으면 낮을수록 측면에 redeposition 되는 양은 감소 할 것이다.

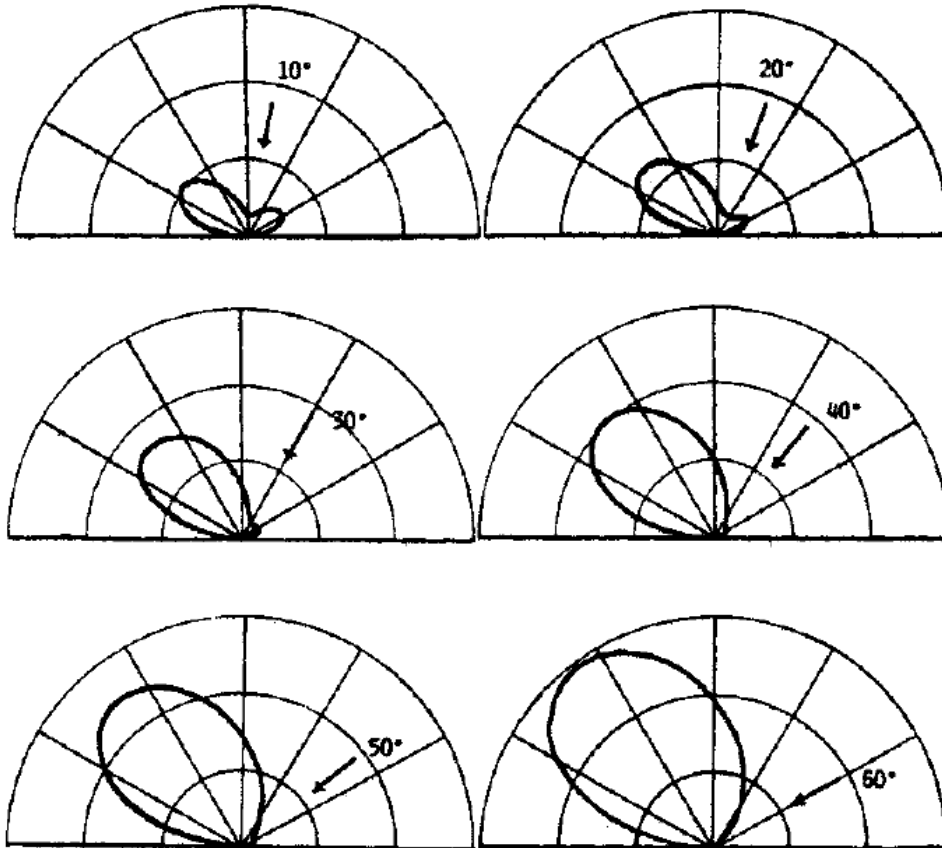


그림 5.6.5 입사각에 따른 sputtered atom 들의 분포 [120]

## 5.6.2 ICP 플라즈마 식각 장치의 facet 및 식각 특성

ICP 플라즈마 식각 장치에서의 facet 및 식각 특성에 대하여 살펴보기로 하겠다. 실험에 사용된 ICP 플라즈마 식각장치는 주변에 전자석이 설치되어 있어서 전류를 흐르게 해주면 M-ICP 플라즈마 식각장치로도 활용이 가능하도록 설계가 되어졌다[38, 49, 72]. 그림 5.6.6 은 M-ICP 플라즈마 식각 장치의 구조인데, 전자석에 전류를 인가하지 않으면 ICP 플라즈마 식각 장치의 구조이기도 하다.

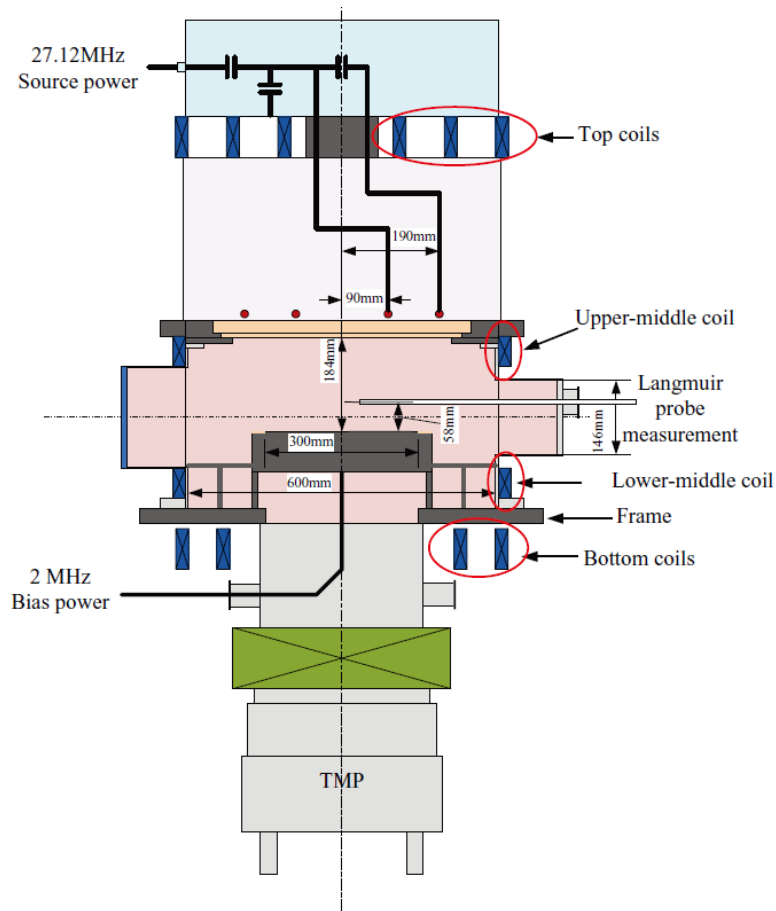


그림 5.6.6 ICP 플라즈마 식각 장치와 주변에 설치된 전자석 coils [38, 49]

실험에 사용한 식각 샘플은 line and space 패턴으로써, 4.3.3 절에서 사용된 CoFeB 물질과 SiO<sub>2</sub> 하드마스크 구조와 동일한 것을 사용하였다. 마스크 높이는 약 500nm, space 폭은 약 1600nm, 식각되는 물질인 CoFeB 의 두께는 500nm 이며 구조를 간단하게 나타내면 그림 5.6.7 과 같다. 소스파워 RF 주파수는 27.12 MHz 를 사용하였으며 1000W<sub>s</sub> 를 인가하였다. 가스는 Ar을 사용하였고 Netural gas pressure 는 5 mTorr 로 고정하였으며 기판에 인가하는 RF bias power 는 500W<sub>b</sub>, 700W<sub>b</sub>, 900W<sub>b</sub> 각각 인가하였다. RF bias power 주파수는 2 MHz 를 사용하였고 facet evolution 특성을 살펴보기 위해 30 초 간격으로 식각 실험을 하였다.

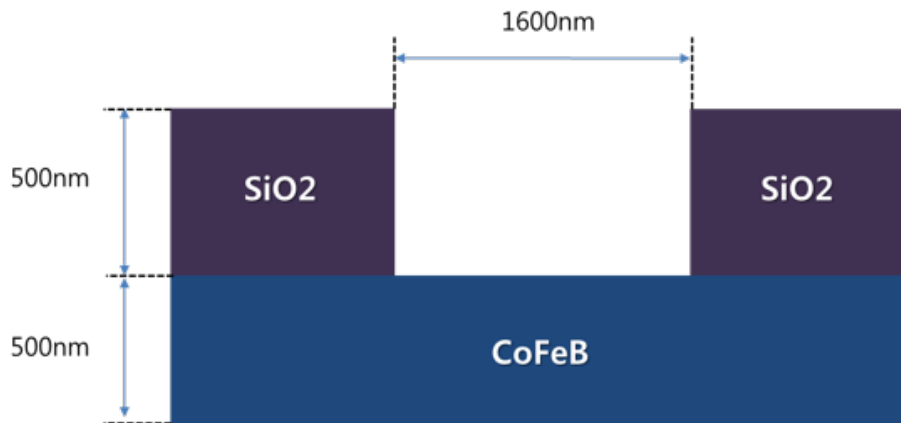


그림 5.6.7 식각에 사용되는 샘플의 측면 모습

그림 5.6.8 ~ 5.6.11 은 ICP 플라즈마 식각 장치에서의 30초 간격의 facet evolution 이다. 그림에서 가장 윗줄은 모두 RF bias power 에 500W<sub>b</sub> 를 인가하였고 가운데 줄은 700W<sub>b</sub>, 가장 아래에 있는 SEM image 들은 900W<sub>b</sub> 를 인가하였다. 각각의 SEM image 에 쓰여진 것과 같이 30 초 간격으로 식각 실험을 진행하여 각각의 실험이 끝난후에 모두 SEM 이미지를 분석하여 시간에 따른 facet evolution 를 살펴 볼 수 있었다. 식각 시간이 30 초 되었을 경우에는

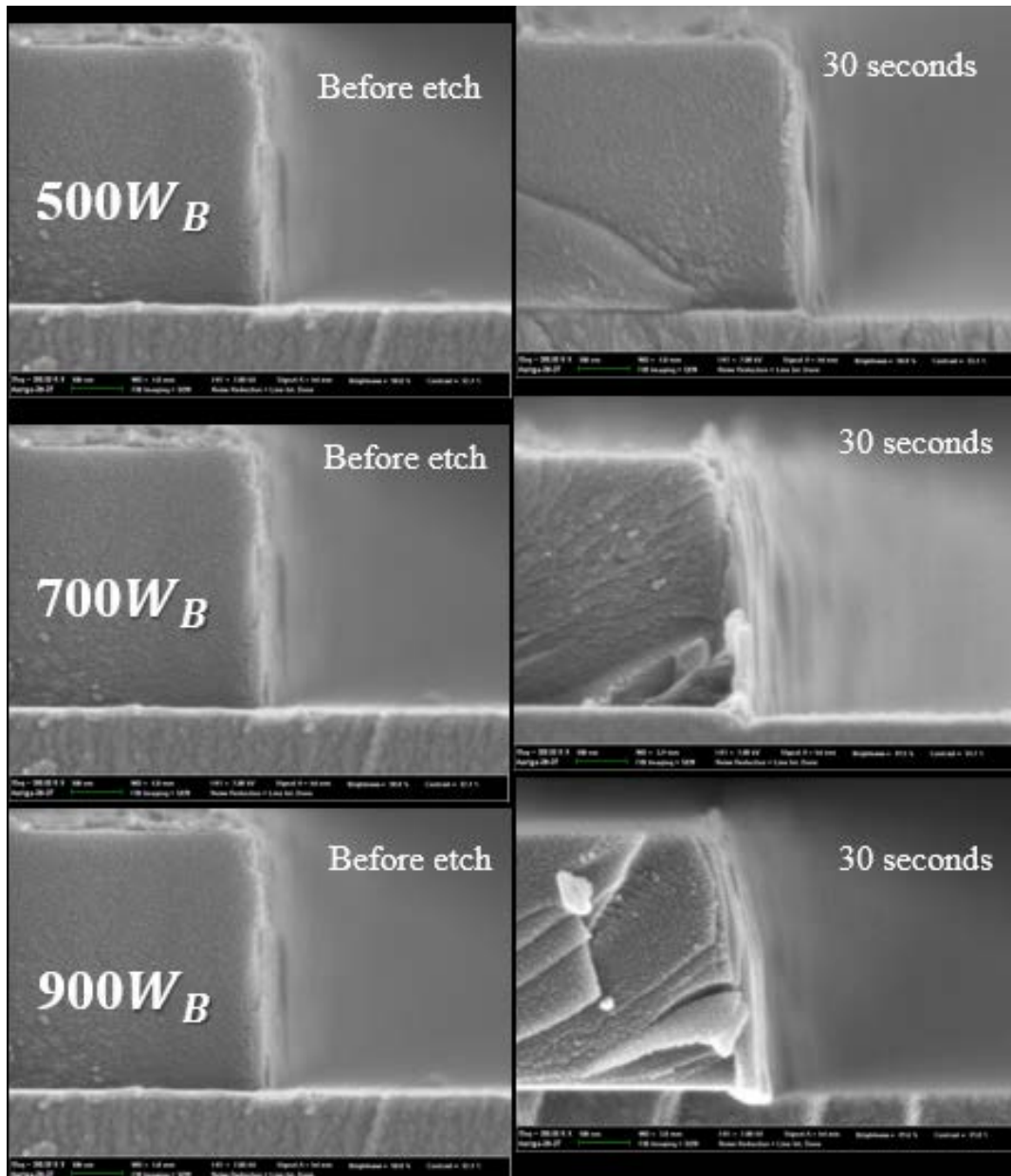


그림 5.6.8 ICP 식각 장치에서의 facet evolution I

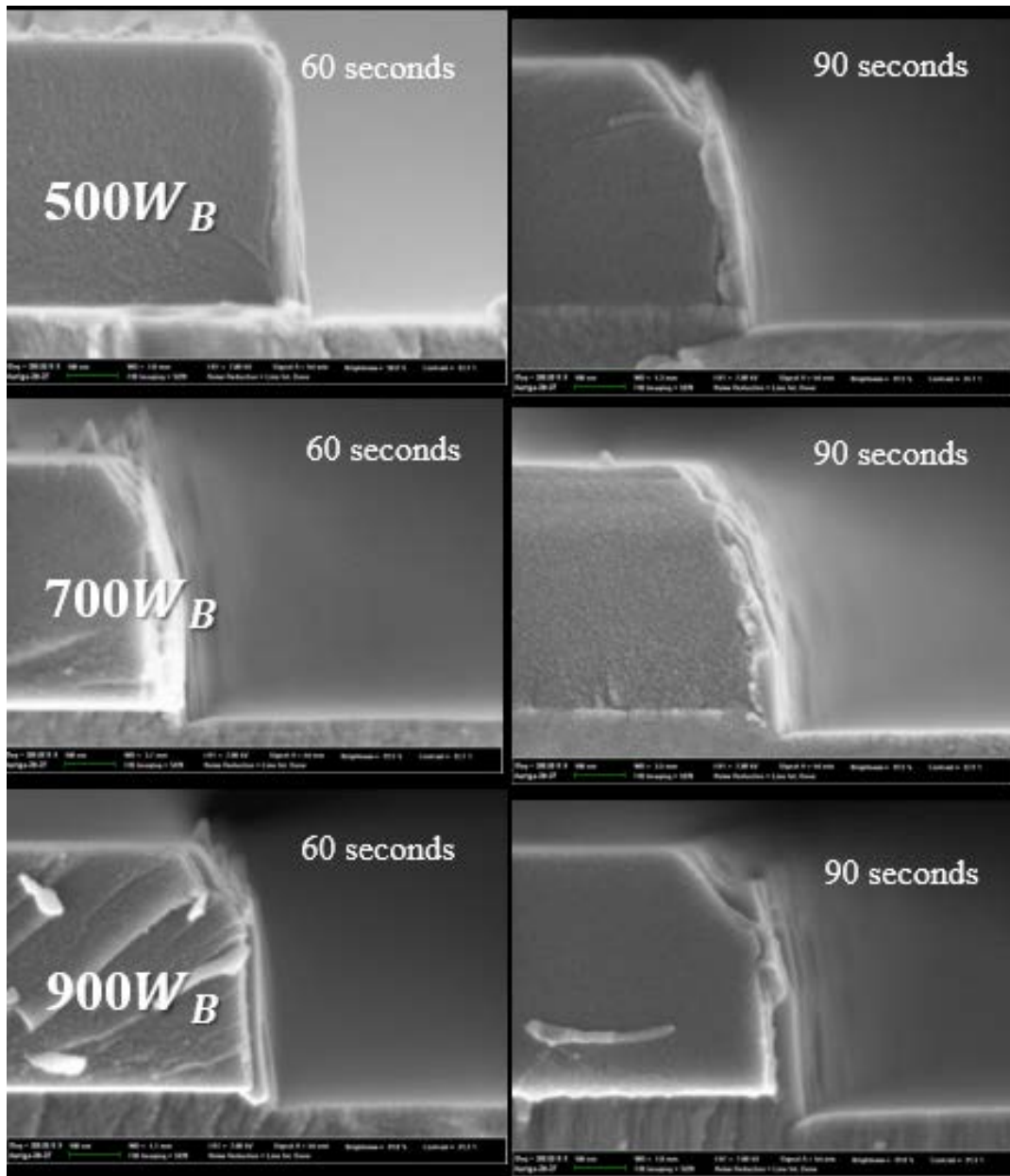


그림 5.6.9 ICP 식각 장치에서의 facet evolution II



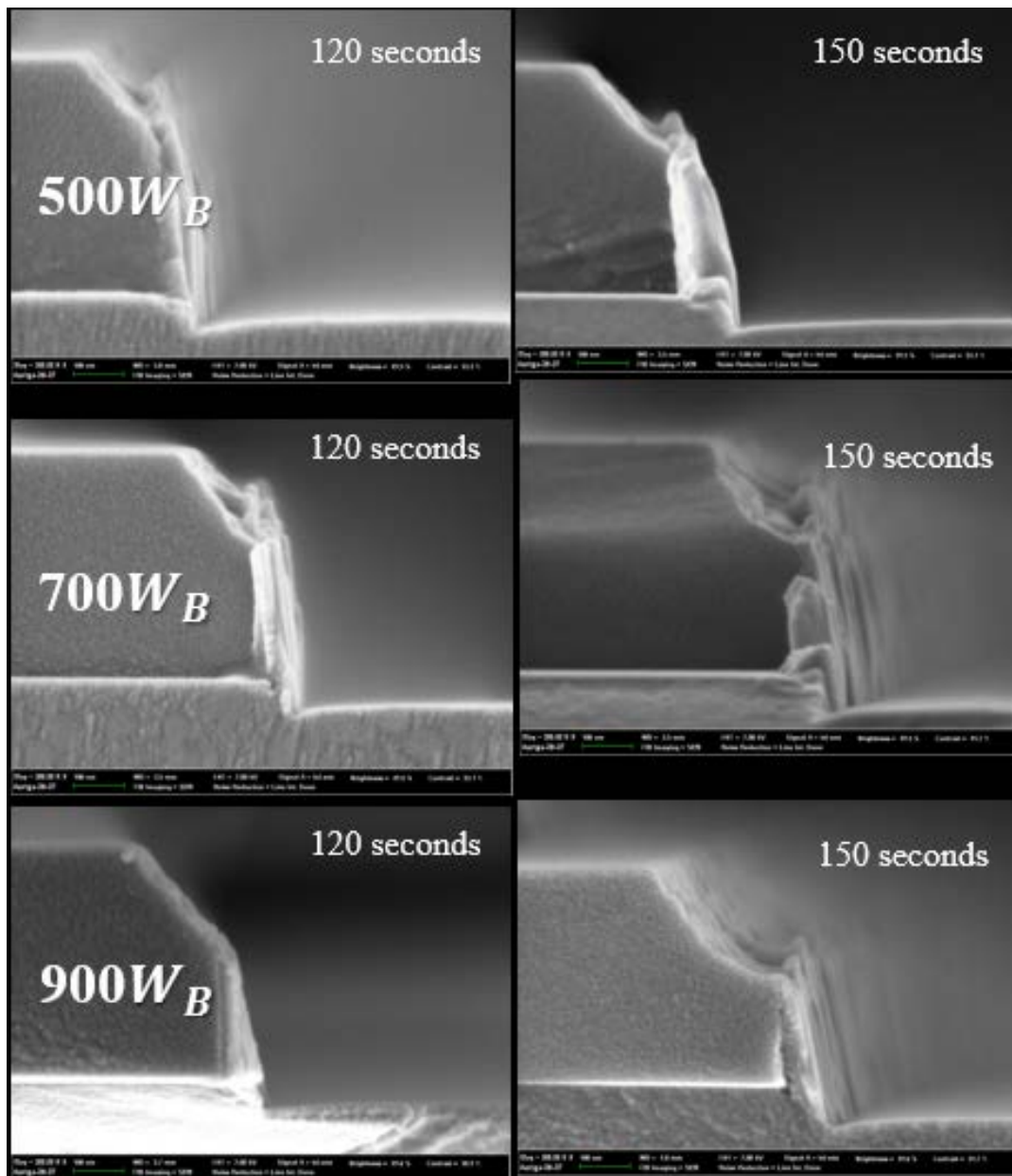


그림 5.6.10 ICP 식각 장치에서의 facet evolution III

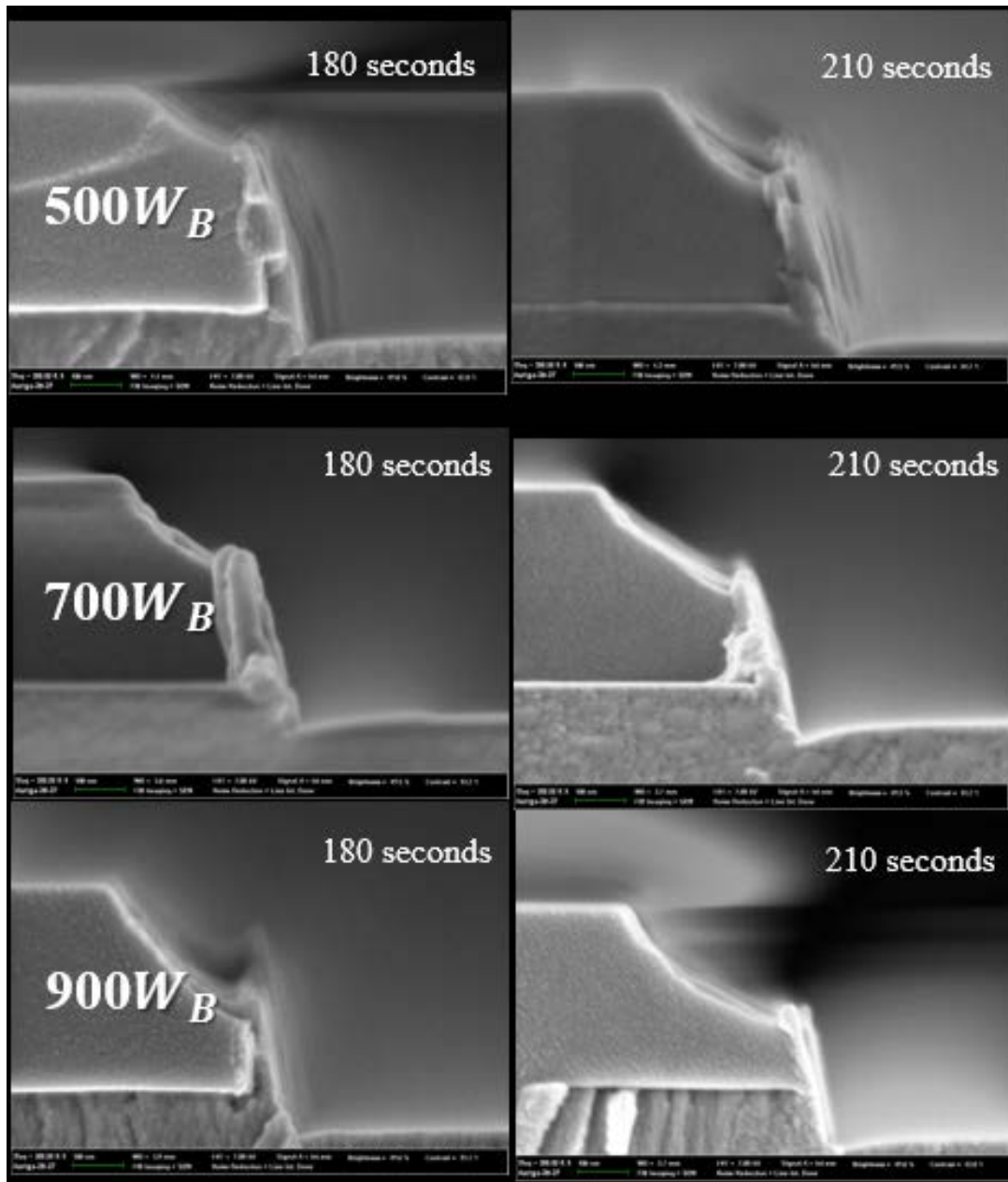


그림 5.6.8 ICP 식각 장치에서의 facet evolution IV

Facet의 형태가 잘 보이지 않다가 60초 이후부터 facet 이 보이기 시작한다. 시간이 경과함에 따라 facet 의 각도는 점차 낮아지며 CoFeB 의 etch depth 또한 증가한다. RF bias power 가 다른 것끼리 비교해 보면, 식각 시간이 같을지라도 bias power 가 커짐에 따라 etch depth 도 커지고 facet 각도도 미세하게 낮아지는 것을 확인 할 수 있다. 특이하게 보이는 거의 모든 SEM image 에서 마스크 인  $\text{SiO}_2$  와 CoFeB 의 경계면 측면에 redeposition 이 상당히 많이 된 것을 확인 할 수 있다. 시간에 따른 facet 각도를 나타내보면 그림 5.6.12 와 같다. 시간이 경과함에 따라 facet 각도가 점차 낮아지고 bias power 가 커짐에 따라서도 미세가 낮아지기는 하지만, 그 차이가 크진 않다.

그림 5.6. 13 은 bias power 에 따른 etch rate 측정 결과이다. CoFeB 의 경우, bias power 가 500W 에서는 약 22nm/min 으로 측정되었지만 bias power 가 900W 로 증가하게 되면 약 35 nm/min 까지 etch rate 이 증가하게 된다.  $\text{SiO}_2$  는

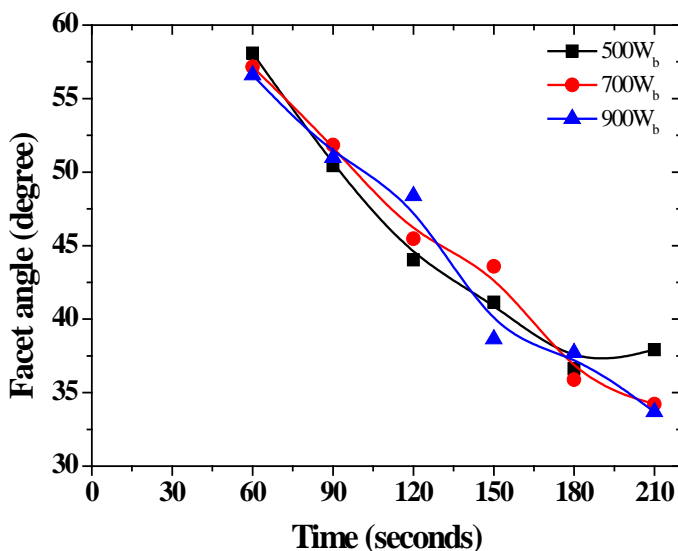


그림 5.6.12 식각 시간에 따른 facet angle 의 변화

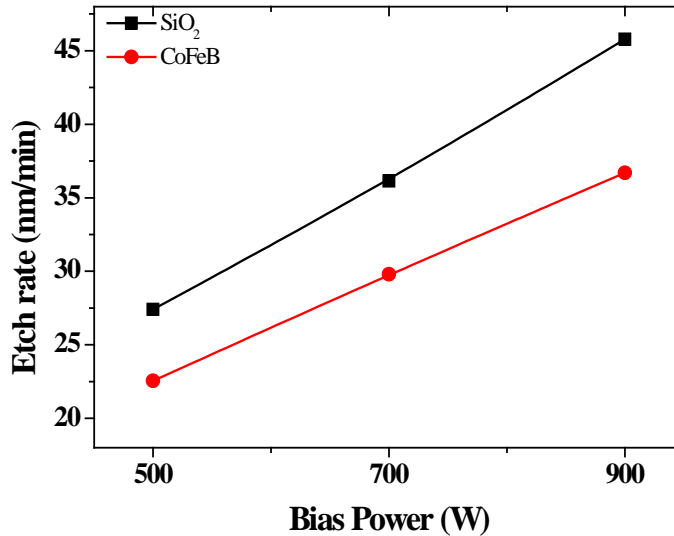


그림 5.6. 13 RF bias power 가변에 따른 etch rate 측정결과

CoFeB 보다 높은 etch rate 도 보이며, bias power 가 증가할 경우, etch rate 의 증가폭도 더 크다. 추가적으로, ICP 플라즈마 식각 장치에서 bias power 변화에 따른 이온 에너지 분포도 IEA 를 이용하여 측정하였으며 이온 에너지 분포 및 ion flux 의 그래프가 그림 5.6.14 와 5.6.15 에 각각 나타나 있다. Bias power 가 증가함에 따라 이온 에너지도 점점 증가하게 되며 ion flux 또한 미세하게 증가하게 된다. 이온 에너지와 ion flux 의 양또한 증가하게 되므로 etch rate 도 증가한 것이라 생각할 수 있다. ICP 플라즈마 식각 장치에서의 식각 시에 생기는 facet evolution 과 CoFeB 와 SiO<sub>2</sub> 의 식각 특성에 대하여 살펴보았다. 다음 챕터에서는 M-ICP 플라즈마 식각 장치에서의 facet 및 식각 특성을 살펴보도록 하여 ICP 플라즈마 식각 장치에서 생기는 특성과 비교해 보도록 하겠다.

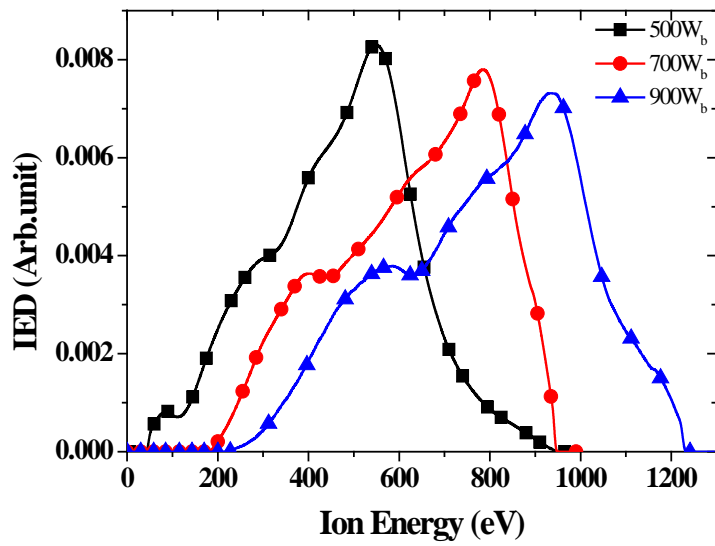


그림 5.6.14 RF bias power 가변에 따른 IEDA

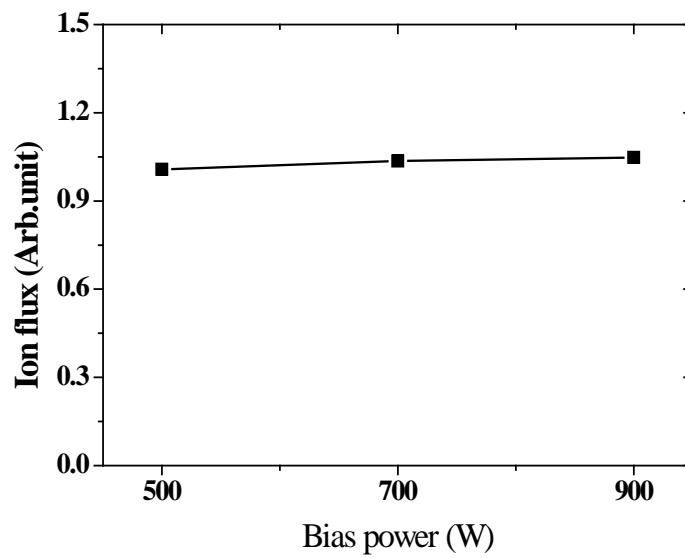


그림 5.6.15 RF bias power 가변에 따른 ion flux 측정 결과

### 5.6.3 M-ICP 플라즈마 식각 장치의 facet 및 식각 특성

M-ICP 플라즈마 식각 장치에서 facet 및 식각 특성에 대하여 살펴보도록 하겠다. 동일한 장비에서 전자석에 전류를 흘려 M-ICP source 를 만들었으며 자기장을 인가하게 되면 플라즈마 밀도는 ICP 대비 약 10 배 이상 높게 되며 전자온도 또한 미세하게 증가한다[49,72]. M-ICP 는 이온 에너지가 ICP 대비 낮아짐에도 불구하고 높은 ion flux 로 인해 etch rate 높다고 알려져 있다. 하지만, facet 특성에 대해서는 보고된 바 없기 때문에, 본 연구에서 ICP 와 M-ICP 의 facet 에 대한 특성 비교를 하여 redeposition 에는 어떤 영향을 미치는지 살펴보고자 한다.

소스 파워는 27.12 MHz 를 사용하였으며 1000 W<sub>s</sub> 를 인가하였다. 가스는 ICP 의 실험과 동일하게 Ar 을 사용하였으며 압력은 1 mTorr 로 고정하였다. 압력의 경우는 방전 가능한 한 최대한 낮게 잡았는데, 그 이유는 M-ICP 플라즈마 식각 장치 특성상 낮은 압력에서도 방전이 가능하며 높은 ion flux 를 얻을 수 있다[49, 72]. 또한, 낮은 압력에서 식각 할 경우는 이온들의 mean free path 도 증가하기 때문에 식각 후에 생기는 byproducts 들이 측면에 붙는 현상을 줄일 수 있다. 즉, M-ICP 플라즈마 식각 장치의 특성상 ICP 플라즈마 식각 장치보다 압력조건을 더 유리하게 가져갈 수 있는 것이다. RF bias power 는 ICP 플라즈마 식각 실험과 동일하게 500W<sub>b</sub>, 700W<sub>b</sub>, 900W<sub>b</sub> 를 각각 인가하였고 30초, 60초, 120초, 150초, 180초, 210초로 각각 식각 실험을 하여 facet evolution 을 살펴보고자 하였다.

그림 5.6.16 ~ 5.6.19 는 M-ICP 플라즈마 식각 장치에서의 30초 간격의 facet evolution 이다. ICP 식각 결과 후의 facet 각도와 비교해보면, 전체적으로 각도가 상당히 낮음을 알 수 있다. 물론, bias power 가 증가함에 따라, 혹은 시간이 경과함에 따라 facet 각도가 낮아지는 경향은 ICP 에서 식각한 결과와 동일하다.

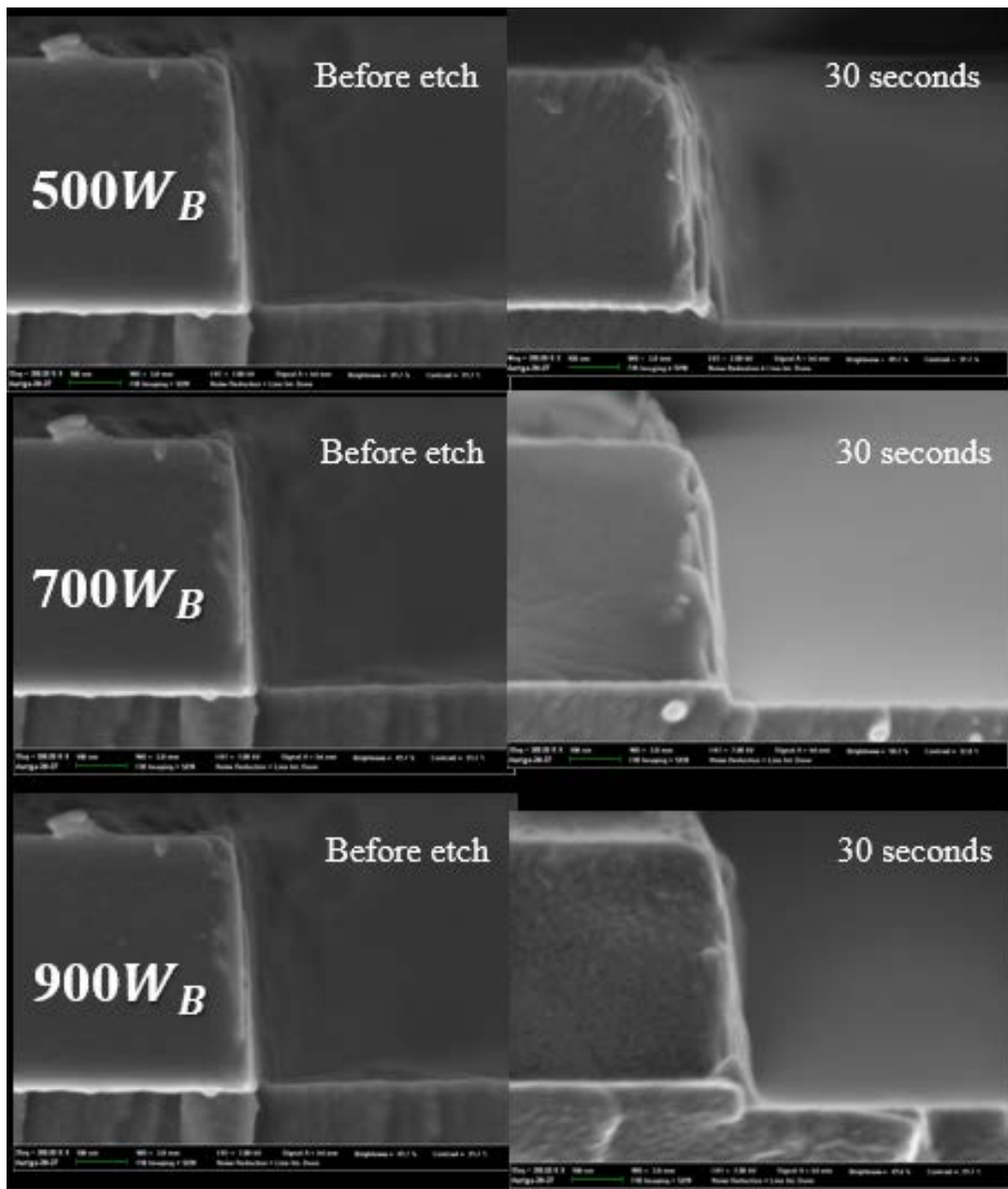


그림 5.6.16 M-ICP 식각 장치에서의 facet evolution I

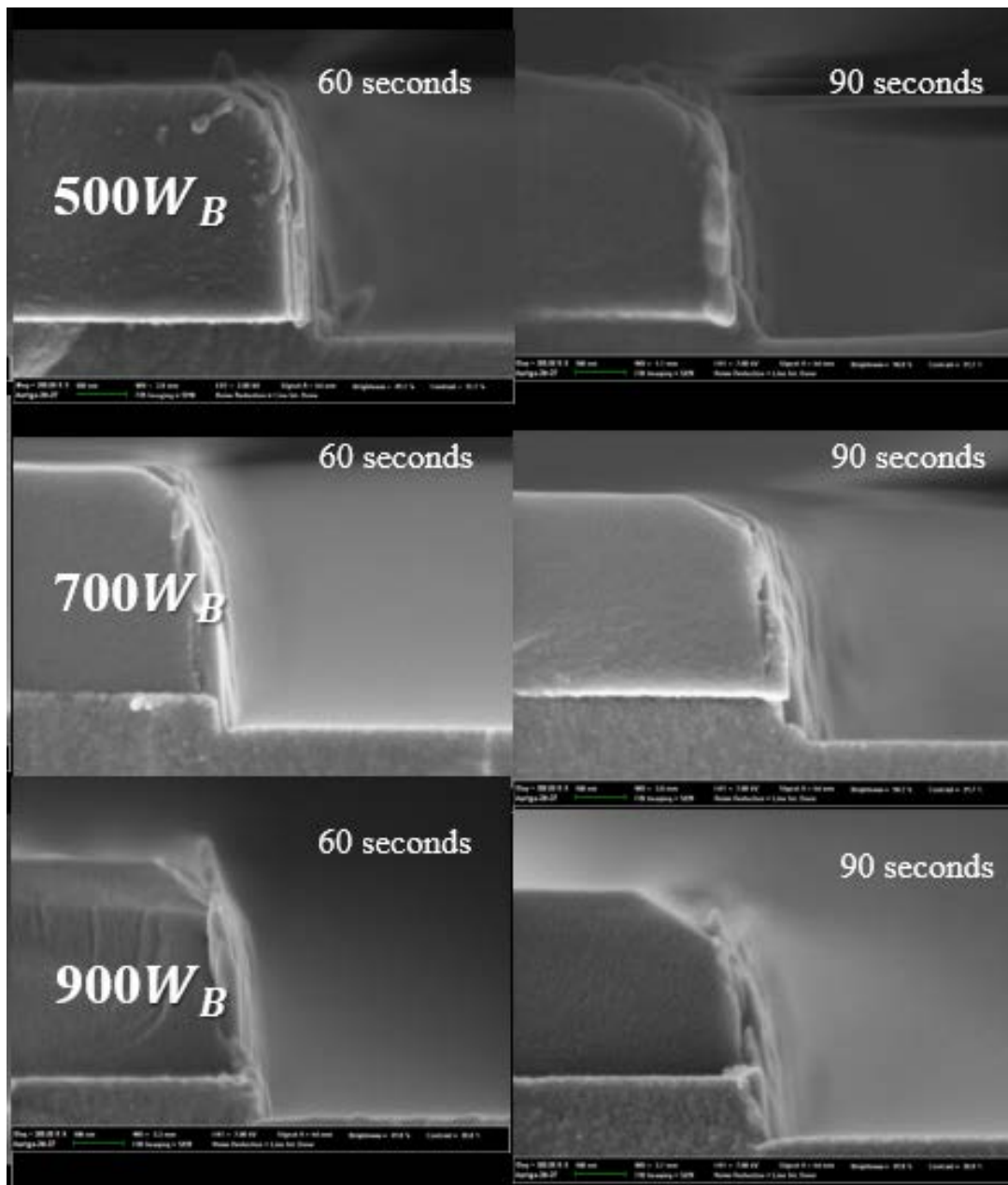


그림 5.6.17 M-ICP 식각 장치에서의 facet evolution II



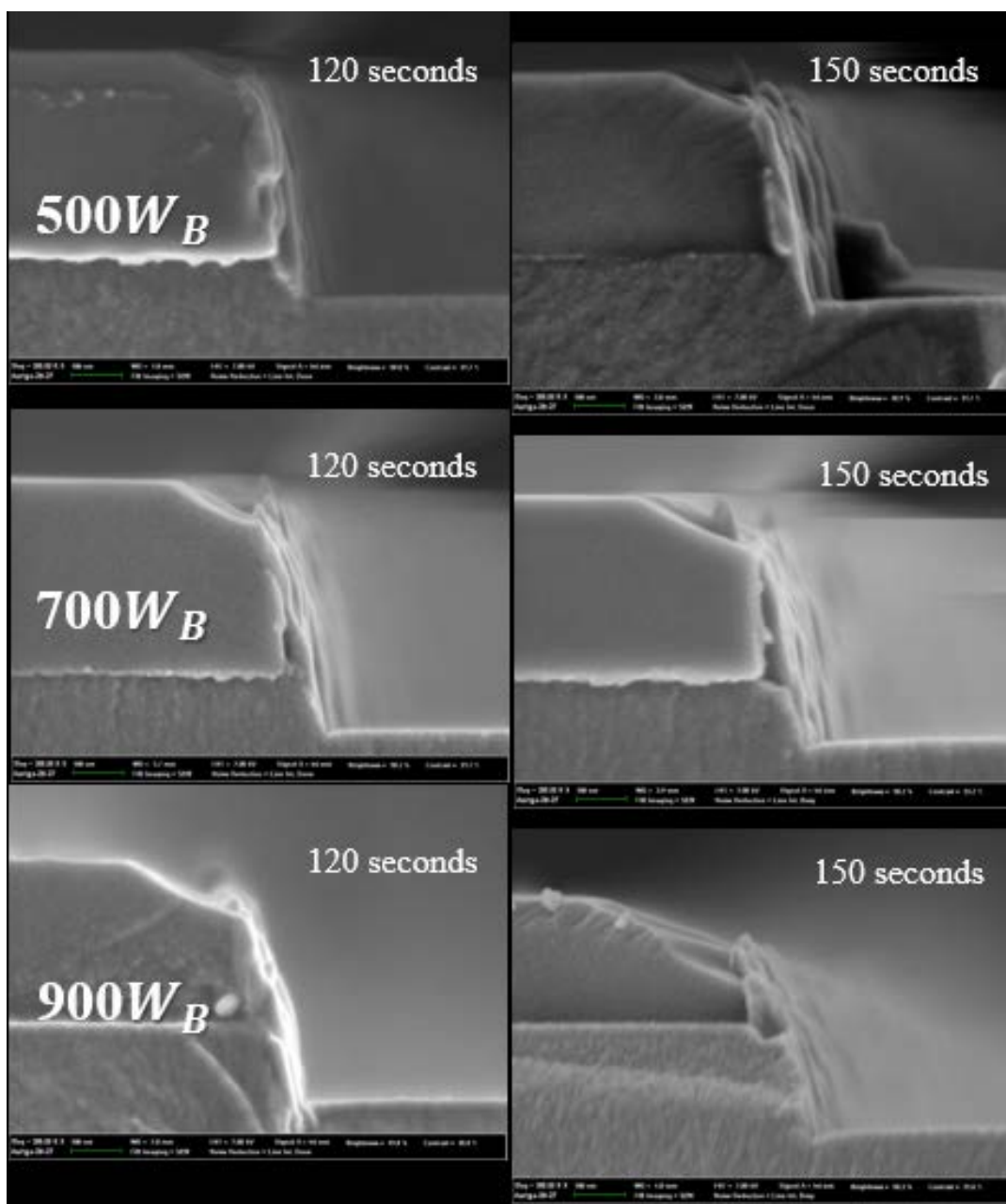


그림 5.6.18 M-ICP 식각 장치에서의 facet evolution III

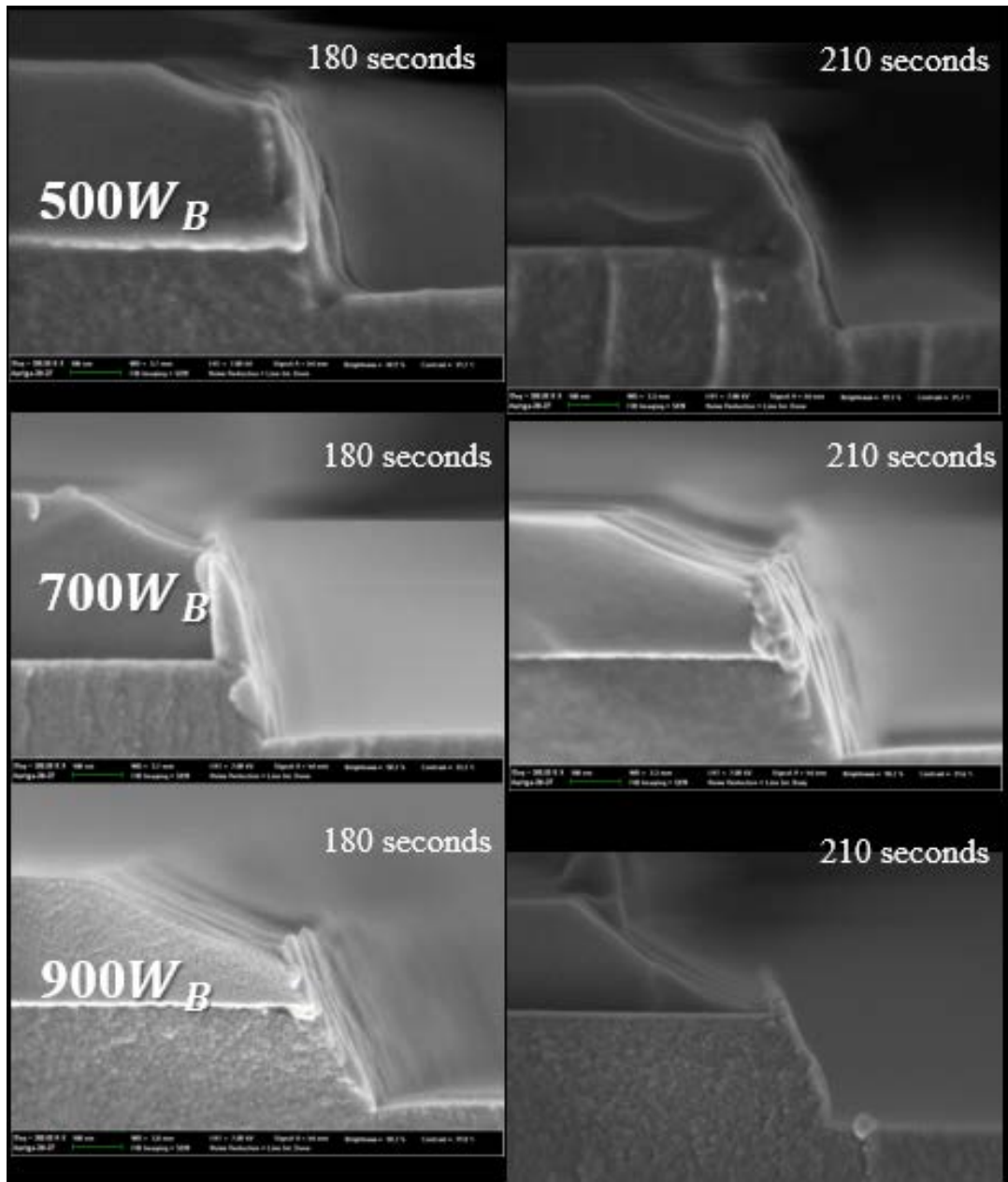


그림 5.6.19 M-ICP 식각 장치에서의 facet evolution IV

M-ICP 플라즈마 식각 장치에서도 facet 은 식각시간이 60초 는 되어야 나타나기 시작한다. 하지만 M-ICP 에서 식각한 facet 의 각도는 ICP 에서 식각한 결과 와는 눈에 뵈 정도로 facet 의 각도가 훨씬 낮다. Facet 의 각도를 ICP 에 서 식각한 결과와 M-ICP 에서 식각한 결과를 정리해보면 그림 5.6.20 과 같이 나타낼 수 있다. Solid symbol 이 M-ICP 에서 식각하였을 때, facet 의 각도 변화를 나타내고 blank symbol 이 ICP 에서 식각하였을 때, facet 의 각도 변화를 나타내고 있다. M-ICP 의 경우, Facet 의 각도는 60초에서는 약 35 도이지만 식각 시간이 지남에 따라 약 20도 까지 낮아진다. 반면에 ICP 에서 식각한 초기에는 약 55도 이상이였지만 식각 시간 3분이 경과한 후에는 약 33도 까지 낮아졌다. 이와 같이 챔버 종류에 따라 facet 의 각도에 큰 차이를 보이고 있다.

Facet 의 각도 차이뿐만 아니라, etch rate 에도 큰 차이를 보이고 있는데 각 챔버 조건에서 bias power 에 따른 etch rate을 비교하면 그림 5.6.21 과 같다.

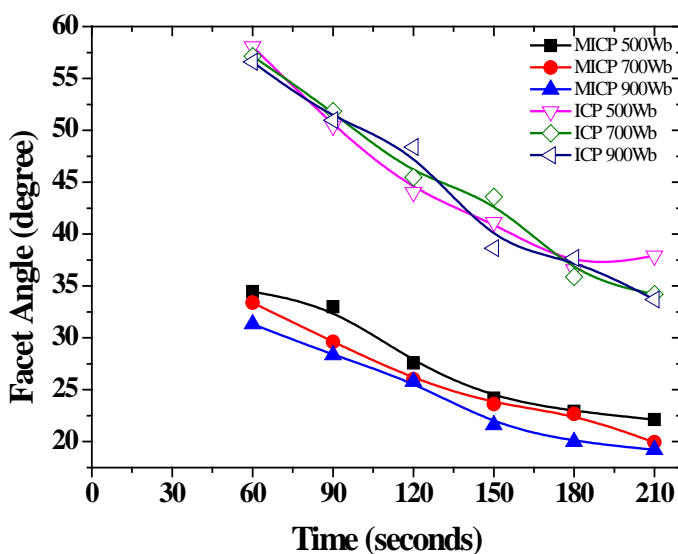


그림 5.6.20 M-ICP 와 ICP 에서 식각 할 경우 facet 의 각도 변화

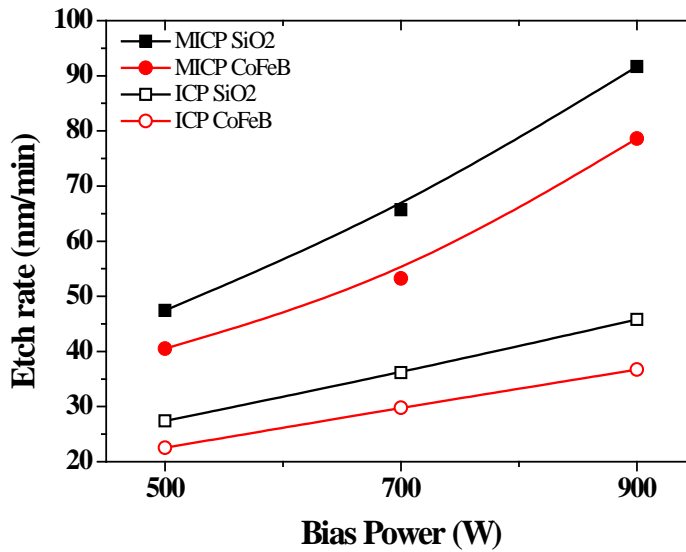


그림 5.6.21 RF bias power 변화에 따른 etch rate 비교

Solid symbol 이 M-ICP 의 식각 결과이며 blank symbol 이 ICP 식각 결과이다. SiO<sub>2</sub> 와 CoFeB 모두 동일한 bias power 를 인가하였을 경우에, M-ICP 의 etch rate 이 더 높은 것을 확인 할 수 있다. M-ICP 에서 CoFeB 물질의 경우, bias power를 900W까지 인가하게 되면 약 80nm/min까지 증가하는 것을 볼 수 있다. 이 결과는 ICP 대비 약 2배 이상 증가하는 수치로써, 더 낮은 압력조건임에도 불구하고 더 높은 etch rate 을 얻을 수 있는 것이다. 더 높은 etch rate 의 이유를 확인하고자 IEA 를 이용하여 ion energy distribution 및 ion flux 를 측정해 보았다. 그림 5.6.22 는 bias power 변화에 따른 M-ICP 에서의 ion energy distribution 이다. Etch rate 은 M-ICP 에서 더 높게 측정되었음에도 불구하고 ICP 대비 상당히 낮은 영역에서 이온 에너지가 분포 하는 것을 볼 수 있다. 이온 에너지 분포와 etch rate 의 결과와 일치 하지 않아 그림 5.6.23 과 같이 ion flux 를 비교하였다.

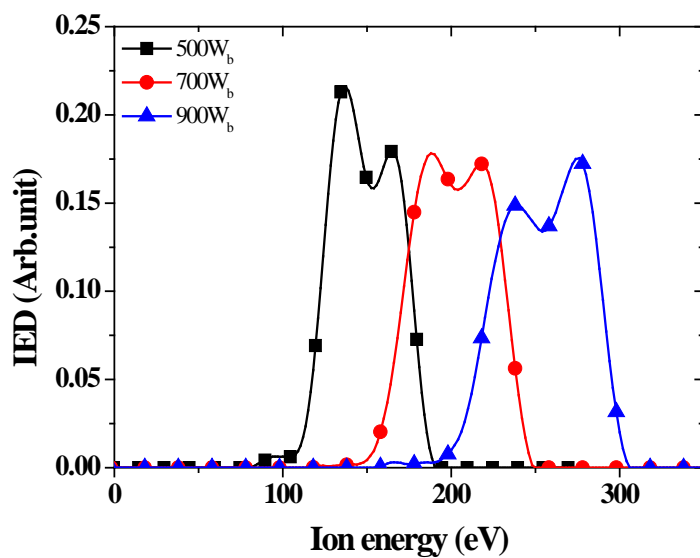


그림 5.6.22 RF bias power 변화에 따른 M-ICP 에서의 IEDF

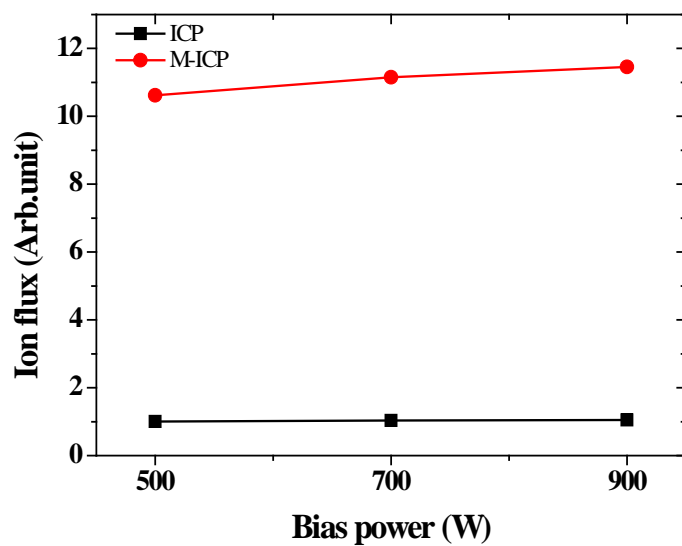


그림 5.6.23 RF bias power 변화에 따른 ion flux 비교 결과

M-ICP 의 경우에는 이온에너지가 낮음에도 불구하고 etch rate 이 높은 이유는 ion flux 가 ICP 대비 10배 이상 높은 것에서 찾을 수 있다. M-ICP 의 특성 상 ICP 대비 높은 플라즈마 밀도가 형성되며, 동일한 bias power 대비 낮은 이온에너지가 측정되지만 ICP 대비 열 배 이상 높은 ion flux 을 얻을 수 있다. 이와 같이 낮은 에너지임에도 불구하고 높은 etch rate 을 얻을 수 있는 특성은 이번 실험에서 잘 드러났다고 볼 수 있다. 입사각에 따른 sputter yield function 은 입사되는 이온 에너지가 커짐에 따라 sputter yield maximum 이 되는 입사각

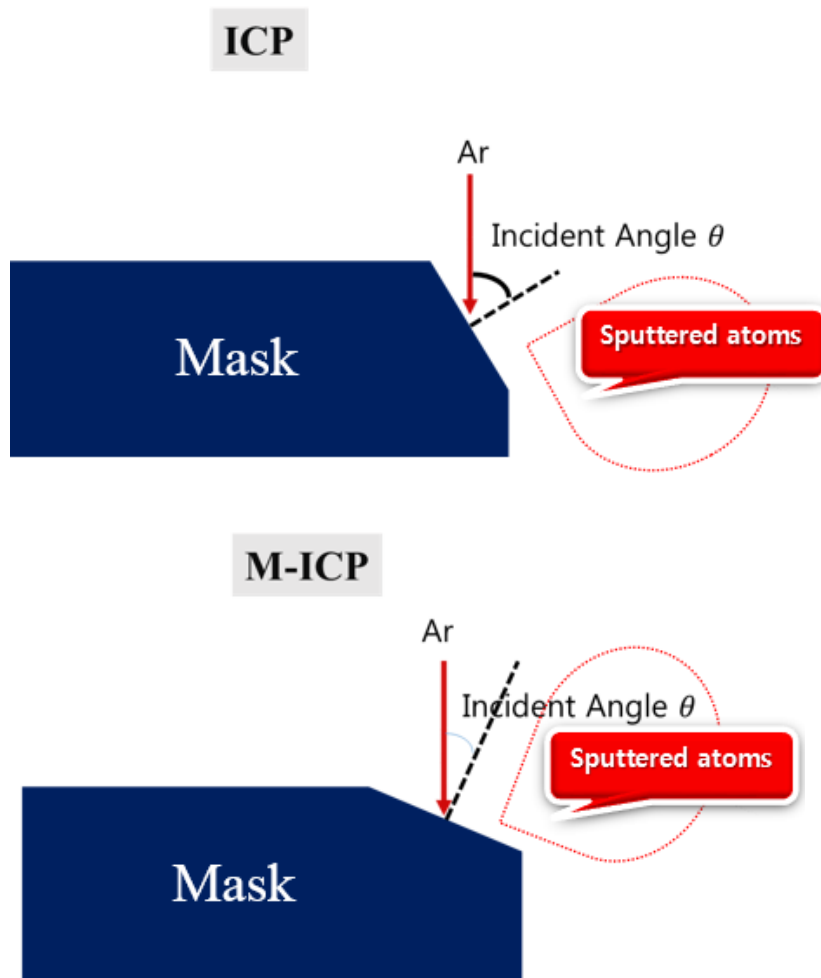


그림 5.6.24 챔버 종류에 따른 sputtered atoms 의 분포

이 점점 높아지는 것을 볼 수 있었다. 이를 facet 각도에 적용해 보면, 높은 에너지의 이온들로 식각 할 경우는, 낮은 에너지를 가지는 이온들로 식각 할 경우 보다 facet 각도가 높아질 것이라 예상할 수 있다. 이상적으로는 facet의 각도는 sputter yield의 maximum이 되는 입사각으로 수렴하게 되기 때문이다. 이와 같은 현상을 ICP와 M-ICP에서 생기는 facet에 적용해보면 그림 5.6.24와 같이 나타낼 수 있다. 그림에서 보면 알 수 있듯이 높은 facet 각도를 가지는 ICP에서 식각 하였을 경우보다 낮은 facet 각도를 가지는 M-ICP에서 식각 하였을 경우가 redeposition 양이 상대적으로 더 적을 것임을 쉽게 예상할 수 있다.

M-ICP에서 facet 및 식각 특성에 대하여 살펴보았다. M-ICP에서는 ICP 대비 낮은 이온 에너지로 식각이 진행됨에도 불구하고 열배 이상 높은 ion flux로 인해 ICP 대비 높은 etch rate을 얻을 수 있다. 뿐만 아니라 이온의 에너지가 상대적으로 ICP 대비 낮기 때문에 더 낮은 facet 각도가 생기게 되며 이로 인해 패턴 측면에 쌓이는 redeposition 양도 ICP 대비 줄일 수 있는 여지가 있다. 물론, facet 각도가 낮아진다고 해서 redeposition 양을 완전히 제거 할 수 있는 것은 아니다. Redeposition은 mask에서 생기는 것뿐만 아니라 CoFeB 식각후에 생기는 non-volatile한 특성을 가지는 byproducts들에 의해서도 발생하기 때문이다. Redeposition을 완전하게 제거하기 위해서는 이온 빔 식각 장치를 사용하게 되는데, 이온빔 식각 장치에서의 식각 특성에 관한 것은 5.7절에서 자세히 살펴보도록 하겠다.

#### 5.6.4 MTJ layer 구성물질들의 식각 특성 비교

ICP 플라즈마 식각 장치와 M-ICP 플라즈마 식각 장치에서의 facet 특성에 대하여 자세히 살펴보았다. 이와 더불어 mask 로는  $\text{SiO}_2$  를 사용하고 CoFeB의 식각 특성을 비교해 보았다. 앞서 설명한 바와 같이 MTJ layer 물질들은 다양한 물질들로 구성이 되어 있기 때문에 CoFeB 뿐만 아니라 다른 물질들의 식각 특성도 살펴보는 것이 중요하다. 따라서 Ta, TiN, W, 의 물질들을 CoFeB의 line and space 샘플 제작과 동일한 과정을 거쳐 추가로 식각 샘플을 제작하였다. 패턴은 CoFeB 패턴과 동일하게 line and space 구조로 되어 있으며 패턴의 폭과 mask 높이, 각각의 물질들이 증착되어 있는 높이도 모두 동일하게 구성하였다. Ta, TiN, W 샘플을 추가로 제작한 뒤 ICP 와 M-ICP 의 식각 특성을 비교해 보았다. 소스파워 주파수는 27.12 MHz 를 사용하였으며 파워는 1000W<sub>s</sub>로 고정하였고 바이어스 파워는 500W<sub>b</sub>로 동일하게 인가하였다. 다만 압력조건은 상이한 조건으로 실험을 하였다. ICP 는 5mTorr, M-ICP 는 1mTorr 로 고정하였다. 압력압력조 고정할 때 mean free path 를 가능한한 길게 하고자 최대한 낮은 압력으로 실험을 진행하려고 하였다. 다만 M-ICP 와 ICP 는 특성상 방전 가능한 최소 압력에 차이가 있었다. M-ICP 는 고밀도 플라즈마 특성으로 인하여 1mTorr 에서도 방전이 가능하였지만 ICP 는 1mTorr 에서 플라즈마 방전조차 되지 않았다. ICP 의 방전가능 최소 압력은 약 3mTorr 였고 압력 변화에 따라 식각실험을 해본 결과, 가장 etch rate 이 높게 확보 되는 압력이 5mTorr 였다. 따라서 ICP 에에 식각할 때 압력 조건은 가능한한 높은 etch rate 이 측정된 5mTorr 로 고정하였다. 이처럼 압력변화에 따른 etch rate 의 maximum 이 되는 지점이 존재 하게 되는데 이러한 현상은 플라즈마 밀도 증가와 sheath 를 통과할 때 생기는 collision 과의 관계 때문에 발생하게 된다[95]. 재현성 확보를 위하여 각각의 물질 종류마다 식각실험을 10번씩 반복하였다.

그림 5.6.25 는 ICP 와 M-ICP 에서 식각한 여러 물질들의 etch rate 을 보여



주고 있다.  $\text{SiO}_2$  의 etch rate이 식각한 여러물질 중에서 가장 높은 것을 확인할 수 있고 Ta, CoFeB, W, TiN 순서대로 etch rate 은 점차 감소하게 된다. 식각한 모든 물질이 M-ICP 의 etch rate 이 더 높은 것을 확인할 수 있다. M-ICP 에서 식각실험을 하게 되면, ICP 보다 더 낮은 압력에서 식각이 가능하여 mean free path 를 더 길게 확보 할 수 있을 뿐만 아니라 etch rate 또한 더 높게 된다. 앞 절에서 살펴본 바와 같이 M-ICP 는 더 낮은 이온 에너지 영역임에도 불구하고 ion flux 가 ICP 보다 월등히 높기 때문에 이와 같은 식각 특성이 나오게 된다.

M-ICP 에서 식각 실험을 할 때, facet 각도가 낮아서 mask 에 의한 redeposition 양이 줄어들 수 있기도 하지만 낮은 압력에서 방전이 가능함에도 불구하고 높은 etch rate 을 확보 할 수 있는 큰 장점이 있다.

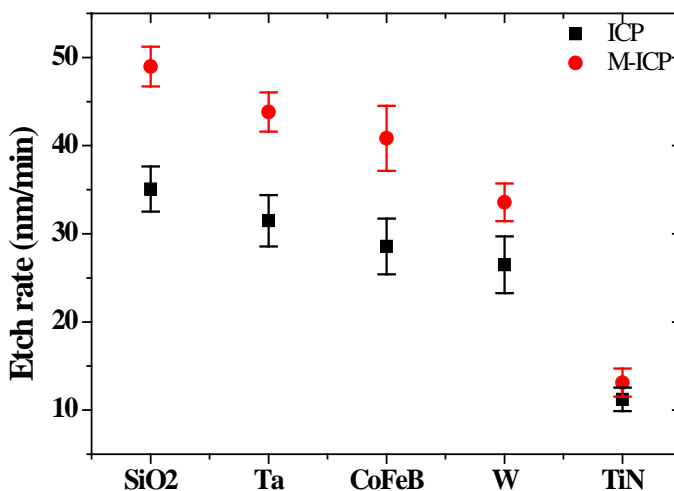


그림 5.6.25 챔버 종류에 따른 다양한 물질들의 etch rate 비교

### 5.6.5 RIE type 식각 장치의 한계성

RIE type 식각 장치인 ICP 와 M-ICP 의 식각 특성에 대하여 살펴보았다. M-ICP 에서는 낮은 압력에서 방전이 가능할 뿐만 아니라 높은 etch rate, 낮은 facet 각도를 얻을 수 있어서, ICP 보다 식각특성이 우수함을 확인 할 수 있었다. 그러나 높은 etch rate 에도 불구하고 그림 5.6.26 과 같이 패턴 측면에 redeposition 되는 것은 완전히 제거하지는 못하였다. M-ICP 에서 식각하면 낮은 facet 각도가 얻어짐으로써 ICP 보다는 mask에서 발생하는 redeposition 되는 양은 적을 수 있으나, 금속물질들의 non-volatile 한 특성으로 인해 식각된 물질이 redeposition 되는것은 줄이지 못하는 것이다. Ar 으로 RIE type 에서 식각할 경우에는, 본 연구에서도 이와 같이 패턴 아래쪽에 redeposition 되는 SEM image 들을 얻을 수 있었으며 선행연구된 연구에도 이와 같은 현상은 보고된 바 있다[109,110].

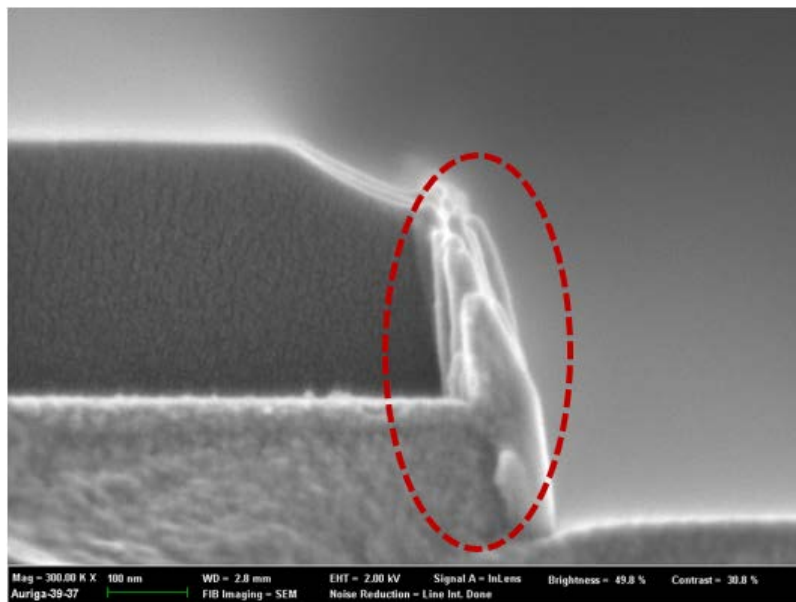


그림 5.6.26 패턴 아래쪽에 redeposition 된 모습

Etch rate 이 어느장비 보다 월등히 높더라도 패턴의 측면에 redeposition 되는 현상이 발생한다면, 이것은 좋지 않은 현상이다. 하나의 물질의 식각 특성을 연구할때에는 문제가 발생하지 않겠지만, 여러 금속물질들로 MTJ layer를 만들어서 식각하게 되면 치명적인 문제가 발생하기 때문이다. 이와 같은 측면에 redeposition 되는 현상을 해결하기 위해 이온 빔 식각 장치에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. RIE 로 해결이 어려운 문제를 physical 한 sputter etching 으로서 해결하고자 하였으며 이와 더불어 측면에 redeposition 된 것을, 기판을 tilt 시켜 측면도 역시 식각 하고자 하였다. 기판을 tilt 한다는 것을 입사되는 이온들의 입사각에 변화를 준다는 의미로써, 패턴의 측면에 금속 물질이 redeposition 되더라도 sputter etching 으로 다시 식각 하겠다는 의미이다.

이와 같은 이유로 인해, 이온 빔 식각 장치의 중요성은 커지게 되었다. ICP source 보다 고밀도 플라즈마가 가능한 M-ICP 로 이온 빔 식각 장치의 source 를 구성하였다. 다음 챕터에서는 ICP 및 M-ICP 플라즈마 식각 장치에서 살펴본 CoFeB 샘플을 이용하여, M-ICP 이온 빔 식각 장치의 식각 특성에 대해 살펴해보도록 하겠다. 이온 빔 식각 장치는 기본적으로 이온 에너지를 쉽게 control 할 수 있는 특성이 있으며 기판이 tilt 된다는 큰 장점이 있다. 따라서 이온 에너지에 따른 식각 특성과 함께 기판이 tilt 될 때의 식각 특성에 대해 자세히 살펴보려고 한다.

## 5.7 M-ICP 이온 빔 식각 장치의 식각 특성

### 5.7.1 이온 에너지에 변화에 따른 식각 특성

RIE type etcher 의 한계성으로 인해 MTJ layer 식각연구에 이온 빔 식각 장치가 많이 사용되고 있다. 완성된 MTJ layer 를 식각하기에 앞서 MTJ layer를 구성하는 물질들의 식각 특성이 필요로 하게 되며, 본 논문에서는 자체적으로 설계 및 개발한 M-ICP 이온 빔 식각 장치를 이용하여 MTJ layer 구성물질들의 식각 특성을 살펴보기로 한다.

앞 단원에서 살펴본 바와 같이 이온 빔 식각 장치가 RIE type etcher 와 구별되는 큰 특징중 하나는 식각 하는 방법이라고 할 수 있다. RIE type 에서는 여러가지 식각 mechanism (ion sputter etching, reactive ion etching, radical etching 등)이 발생하는 반면에, 이온 빔 식각장치에서는 ion sputter etching 에 주로 의존한다고 볼 수 있다. 이에 따라 이온의 에너지와 flux 의 양으로써 etch rate 에 변화를 가져 올 수 있게 된다. 특이한 점을 이온 빔 식각 장치는 가지고 있는데 RIE type 과 다르게 substrate 의 tilt 가 가능하다는 점이다. 이로 인해, 이온들의 입사각을 조절할 수 있고, 이온이 기판으로 입사하는 입사각을 조절함으로써 궁극적으로 etch rate 도 control 이 가능하다. 이처럼 RIE type 과 구별되는 특징을 가지고 있으므로 이온 빔 식각 장치만의 활용성이 있다.

이온 빔 식각 장치만의 특징은 하나의 chamber 로 되어 있는 것이 아니라 discharge chamber 와 ion propagation chamber 로 나뉘져 있으며 각각의 하는 역할이 있다. 또한 discharge chamber 와 ion propagation chamber 사이에 screen grid 와 accelerator grid 가 있다. 두 개의 그리드의 역할로 인해 이온 빔 식각 장치만의 특성이 나타나게 된다. 그 중에서 screen grid 의 역할은 앞서 살펴본 바와 같이 이온 에너지를 결정하게 된다. 이온 에너지의 크기에 따라 물질의 sputter yield 에 큰 차이를 가져오고 이로 인해, etch rate 에도 큰 차이를 가져오

게 된다. 따라서 이온 빔 식각 장치의 etch rate 을 논할 때에는 반드시 이온 에너지의 control 변수인 screen grid 전압이 수반되어야 한다. 단순히 etch rate 을 높이려고 한다면 높은 이온 에너지로 식각 하면 되기 때문이다. 하지만, 높은 에너지를 가지는 이온으로 식각 하게 되면 ion 의 penetration depth [122-124] 로 인한 damage 가 발생하게 된다[68]. 따라서 가능한한 이온 데미지를 줄이기 위해서는 낮은 에너지로 식각을 해야만 하는데 일반적인 이온 빔 식각 장치는 그림 5.6.27 과 같이 ion flux 를 높이게 되면 이온 에너지도 같이 증가하게 된다[121].

하지만, 본 연구에서 사용된 M-ICP 이온 빔 식각 장치는 동일한 이온 에너지를 사용하더라도 ICP 이온 빔 식각 장치에 비해 높은 ion flux 얻을 수 있었다. 따라서 ion flux 을 높게 얻고자 이온 에너지를 올리지 않아도 ICP 주위에

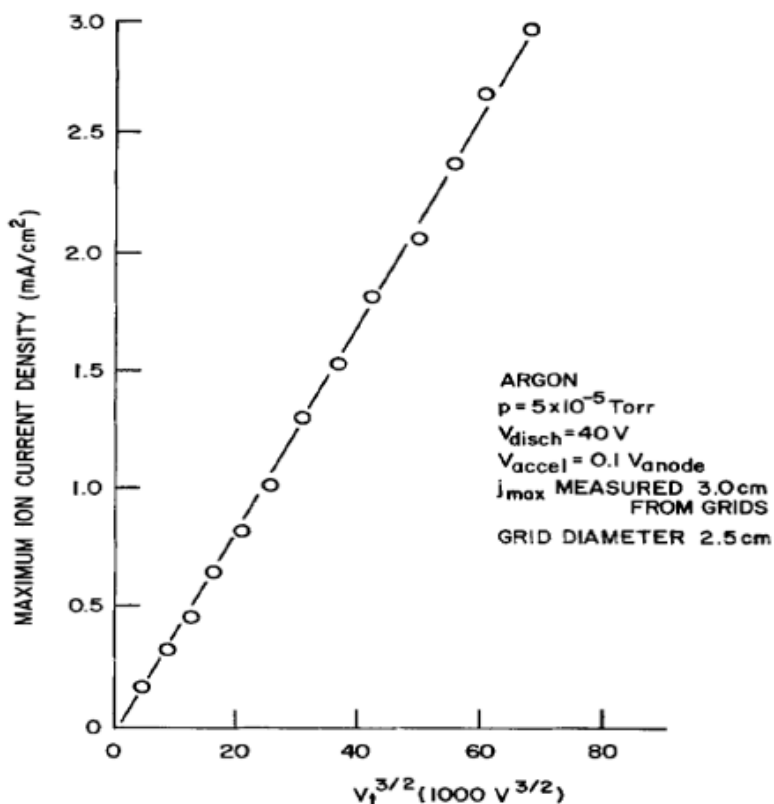


그림 5.6.27 이온 에너지 전압과 ion current density 와의 관계[121]

인가되는 자기장의 가변을 통해 ion flux 를 증가시킬 수 있었다. M-ICP 이온 빔 식각 장치의 실험에 사용된 이온 에너지는 100eV ~ 500eV 로써 일반적으로 사용되는 이온 빔 식각 장치보다 비교적 낮은 에너지를 사용하여 MTJ layer 구성물질들의 식각 특성에 대하여 살펴보았다.

MTJ layer 를 구성하는 여러가지 물질중 SiO<sub>2</sub>, CoFeB, W, TiN 의 식각 특성을 살펴보았다. RF source power 는 주파수는 27.12 MHz 를 사용하였으며 500W<sub>s</sub> 를 인가하였다. Screen grid 중앙에서의 자기장은 16 G 로써, 전자석에는 600 mA 전류를 인가하였다. 기판 tilt 각도는 0 도로써 수평한 상태를 유지한채 식각 실험을 하였다. 각각의 조건들마다 동일하게 식각 시간은 10분이다. 그림 5.6.28 은 screen grid 전압 가변에 따른, 즉 이온 에너지 변화에 따른 CoFeB 식각 후 SEM image 이다. Mask 는 SiO<sub>2</sub> 를 사용하였기 때문에 식각 후의 etch rate 은 mask 와 CoFeB 를 동시에 측정할 수 있다. 샘플 구조는 앞 절에서 사용한 것과 동일한 구조이다. 이온 에너지가 증가함에 따라 etch depth 가 증가하는 것을 확인 할 수 있다. Etch depth 를 식각 시간으로 나워 etch rate 으로 나타낸 것은 그림 5.6.29 와 같다. 이온 에너지가 100eV 일 때 SiO<sub>2</sub> 와 CoFeB 의 etch rate 은 5 nm/min 도 되지 못하지만 이온 에너지가 500eV 로 증가하게 되면, SiO<sub>2</sub> 는 약 35 nm/min 으로 측정되었다. CoFeB 는 SiO<sub>2</sub> 보다는 etch rate 이 떨어지게 되고 약 28nm/min 으로 측정되었다. 전반적으로 etch rate 을 살펴보았을 때 SiO<sub>2</sub> 가 CoFeB 보다 etch rate 높다. 이와 같은 결과는 RIE type 식각 장치에서도 나타났던 현상으로써 각 물질들의 etch rate 의 절대적인 수치의 차이는 있더라도 어떤 물질이 식각이 잘되느냐 하는 것은 고유의 특징이라고 볼 수 있다.

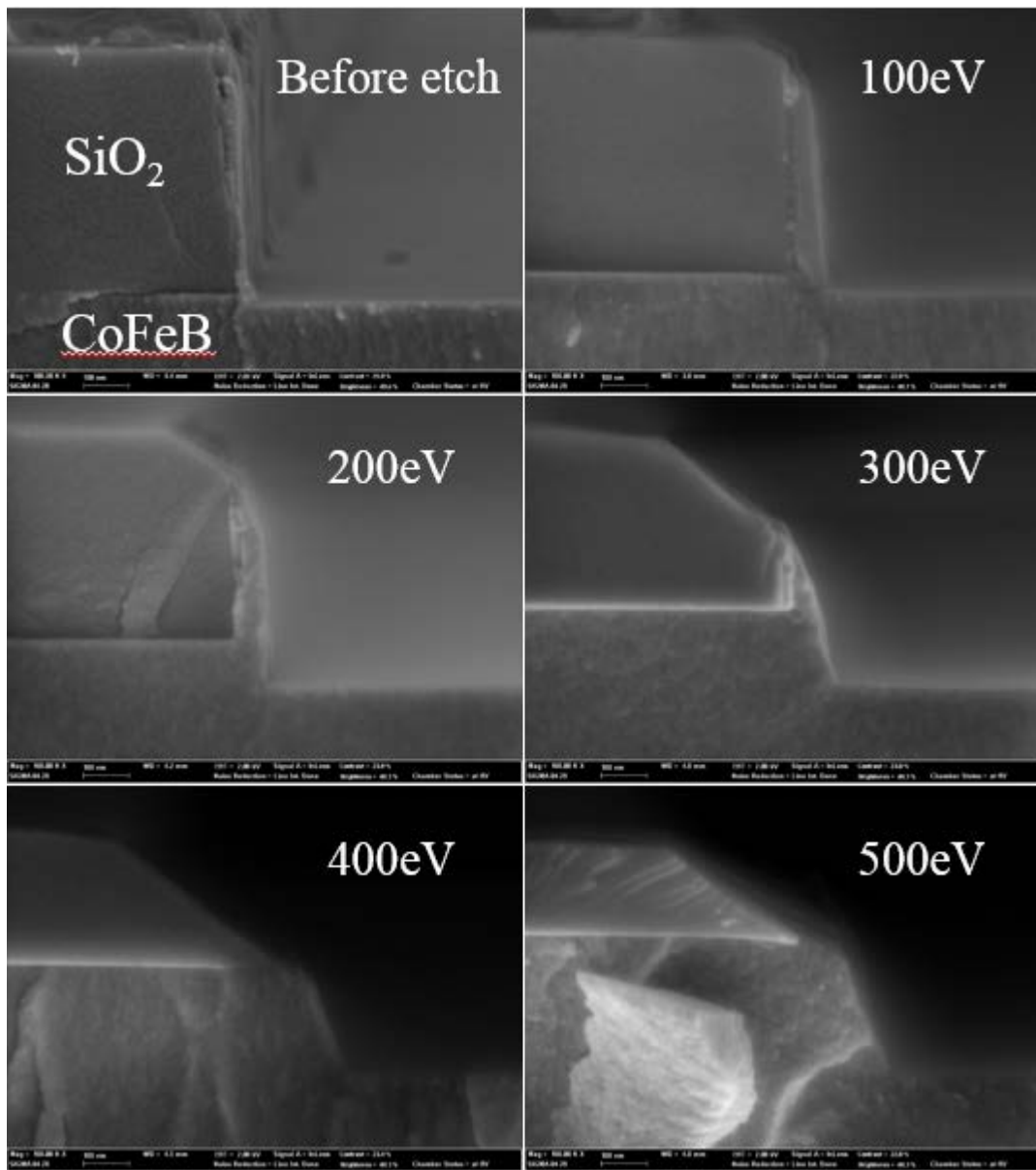


그림 5.6.28 이온 에너지에 변화에 따른 CoFeB 샘플의 식각 후 모습

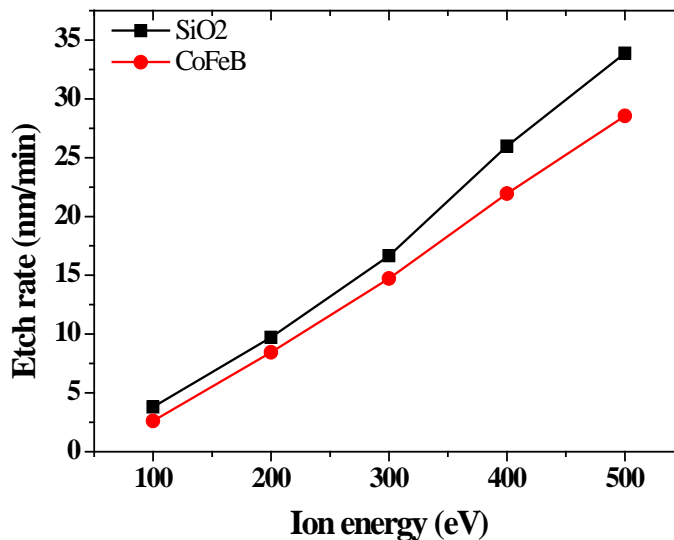


그림 5.6.29 이온 에너지 변화에 따른 SiO<sub>2</sub> 와 CoFeB 의 etch rate

이온 에너지 변화에 따른 CoFeB 와 SiO<sub>2</sub> 의 etch rate 측정결과를 살펴보았다. 이와 마찬가지로 동일하게 W, TiN 의 샘플로 실험을 하였다. 그림 5.6.30 은 W 과 TiN 의 etch rate 을 나타낸 그래프이다. W 의 경우에는 100eV 에서는 약 2.5nm/min 의 etch rate 이 측정되었지만 500eV 가 되면 약 27nm/min 의 etch rate 이 측정되었다. TiN 의 경우에는 이온 에너지가 100eV 와 200eV 에서는 식각이 거의 되지 않았다. 10 분동안 식각 했음에도 불구하고 식각하기 전과 거의 동일한 패턴의 모습을 확인 할 수 있었다. 이것은 각 물질들마다 sputtering 이 되기 위해서는 필요한 최소 에너지가 있는데 TiN 의 최소로 필요한 이온 에너지가 다른 물질들보다 높기 때문인 것으로 생각된다. TiN 은 300eV 가 되어서야 etch rate 을 측정할 수 있었다. 하지만 역시 다른 물질들보다 sputtering 이 되기 위해 필요한 최소에너지가 큰 만큼 etch rate 도 다른 물질에 비하여 현저히 떨어지는 모습을 볼 수 있다. 이온 에너지가 적어도 300eV



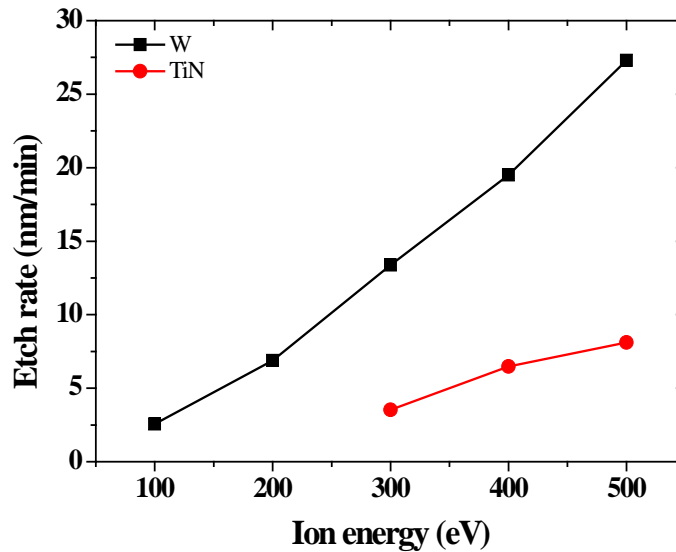


그림 5.6.30 이온 에너지 변화에 따른 W 와 TiN 의 etch rate

은 되어야만 약 3.5nm/min 의 etch rate을 얻을 수 있었으며 500eV 가 되더라도 etch rate 이 10nm/min 도 되지 않을 만큼 낮은 etch rate 이 측정되었다.

각 샘플의 Mask 인  $\text{SiO}_2$  의 etch rate 을 비롯하여 CoFeB, W, TiN 의 이온 에너지 변화에 따른 etch rate 을 살펴보았다. RIE etcher 의 식각 mechanism 은 sputter etching 을 포함한 다양한 요인이 있지만, IBE 에서는 주요한 식각 mechanism 은 ion 의 sputter etching 뿐이다. 그렇기 때문에 RIE type 의 M-ICP 플라즈마 식각 장치보다는 etch rate 이 낮게 측정되었다. 그러나 기관의 tilt 기능이 있는 이온 빔 식각장치의 특성을 이용하면 낮은 etch rate 의 단점보다도 패턴 측면의 redeposition 을 해결할 수 있는 매우 큰 장점이 있다. 다음 절에서는 기관 tilt 각도에 따른 식각 특성에 대해 자세히 살펴보려고 한다.

## 5.7.2 기판 tilt 각도 변화에 따른 식각 특성

일반 적인 RIE type 플라즈마 식각 장치보다도 etch rate 이 낮음에도 불구하고 이온 빔 식각 장치가 사용되는 주된 이유 중에서 하나는 기판 tilt 기능 때문이다. 기판이 기울어진 상태에서 기판 자체가 회전하지 않으면 line and space 패턴의 경우, 어느 한 면만 계속 식각이 될 것이다. 따라서 기판이 tilt 기능이 있으면 기판 자체적으로 회전하는 기능 또한 필수적으로 요구된다. 본 실험에 사용된 M-ICP 이온 빔 식각 장치도 기판 자체적으로 회전하는 기능과 tilt 하는 기능이 동시에 가능하도록 설계되어 있다. 그렇기 때문에 식각시에는 기판 tilt 와 기판 rotation 기능을 모두 활용하여 실험을 하였다. 앞서 설명한 바와 같이 기판을 tilt 한다는 의미는 이온의 입사각을 변화시킨다는 의미이다. 입사되는 이온들의 입사각이 변화하게 되면 sputter yield 가 변화하게 된다. 따라서 기판 tilt 변화에 따라 CoFeB, W, TiN 의 etch rate 변화를 살펴보고자 한다.

RF source power 의 주파수는 27.12 MHz 이고 파워는 500W<sub>s</sub> 를 인가하였다. Screen grid 전압은 300V, 전자석에 흘리는 전류는 600mA 로써 16 G 조건으로 고정하였다. 기판 rotation 은 60 rpm 으로 고정하였으며 식각 시간은 10분으로 일정하게 실험을 하였다. 기판 Tilt 는 0, 20, 40, 60, 80 도로 각각 변화시켰다. 그림 5.6.31 은 CoFeB 를 기판 tilt 각도 변화에 따라 식각한 SEM image 이다. 기판 tilt 각도 변화에 따라 etch depth 뿐만 아니라 식각된 profile 도 다른 것을 확인 할 수 있다. Etch rate 을 살펴보기에 앞서 패턴의 측면을 살펴보면, RIE type 에서 식각 하였을 때 생기는 redeposition 의 형상이 거의 없는 것을 확인할 수 있다. 식각된 profile 측면에서 살펴보면, tilt 가 되면 mask 근처의 CoFeB 와 mask 와 멀리 떨어진 곳의 CoFeB 에서 etch rate 의 차이를 볼 수 있다. 이러한 현상은 tilt 가 되면 mask 의 높이로 인해 이온들이 닿지 않는 부분이 존재하기 때문이다. 이 현상을 shadow effect 라고 한다. 그림 5.6.32 와 같이 기판

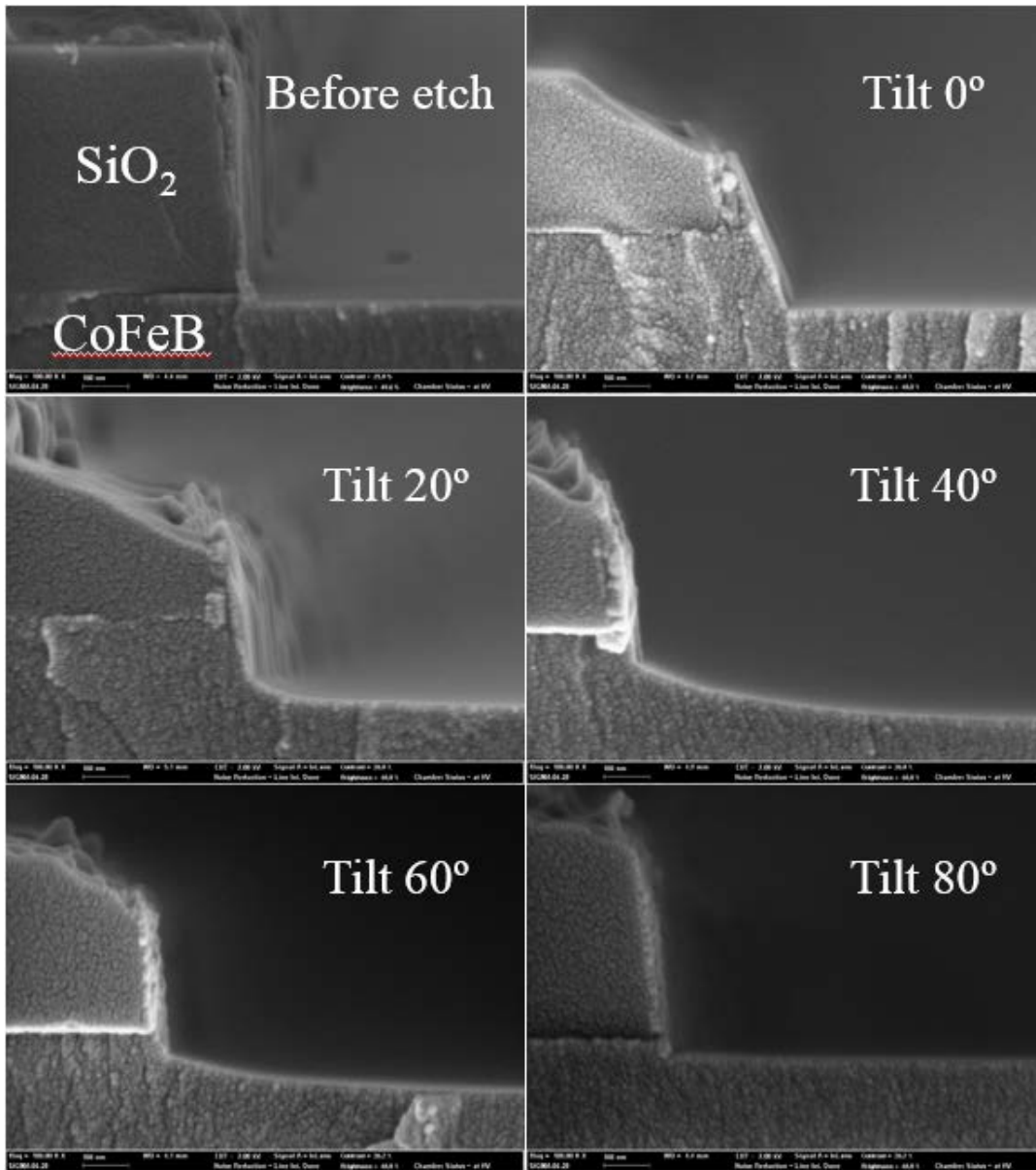


그림 5.6.31 Tilt 각도에 따른 CoFeB 의 식각 후의 SEM images

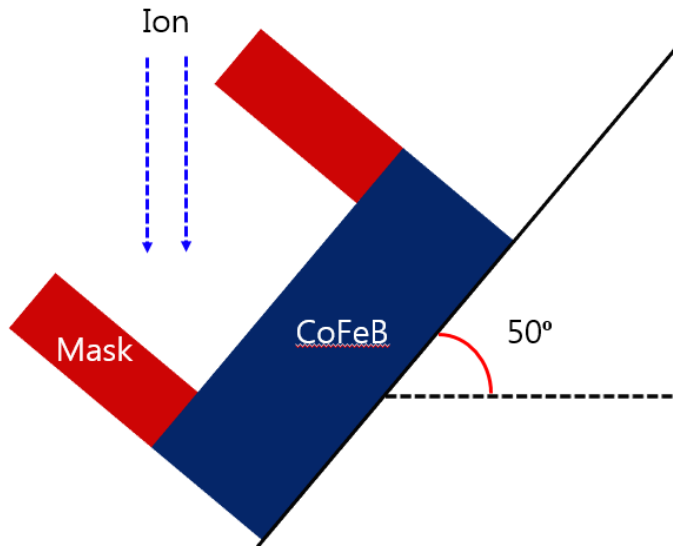


그림 5.6.32 기판이 50 도 기울어진 경우 시각 모형

이 50도 기울어져 있다고 생각해 보자. 그림에서 보는 것과 같이 이온들이 닿지 않아 식각되지 않는 부분이 생기게 되고 이를 보완하고자 기판 회전을 시키는 것이다. 회전을 시키더라도 CoFeB의 중앙은 이온들이 항상 입사되는 것에 비해 mask 근처의 CoFeB가 있는 영역은 당연히 etch rate이 떨어질 수밖에 없다. 이와 같은 현상으로 인해 그림 5.6.31의 SEM image에서 40, 20, 40, 60도에서는 CoFeB 중앙과 mask 근처의 CoFeB에 etch rate의 차이가 발생하게 된다. 본 실험은 tilt 각도 변화에 따른 etch rate의 차이를 보려는 의도이기 때문에, CoFeB의 중앙지역의 etch rate으로 모든 조건들을 비교하고자 한다. CoFeB의 샘플뿐만 아니라 W, TiN의 샘플도 동일한 방법으로 실험을 하여 tilt 각도에 따른 etch rate을 모두 측정하였고 그 결과를 그림 5.6.33에 나타내었다. Tilt 각도가 40도 일 경우가 etch rate이 가장 높게 측정되었으며 다른 금속 물질들에 비해 SiO<sub>2</sub>의 상승폭이 훨씬 컸다. 반면에 낮은 etch rate을 가지는 TiN의 경우에는 입사각에 변화를 주더라도 etch rate에 큰 변화는 찾을 수 없었다. 이처럼 기판을 tilt시켜 이온의 입사각에 변화를 줄 수 있고, 입사각 변화에 따른 차이는 etch rate의 차이로 나타나게 된다. 하지만 기판을 기울였

다고 해서 그 각도 그대로 이온들이 입사되는 것이 아니다. 이온 빔 식각장치는 그리드를 통과하는 이온들이 일정한 **divergence** 각도를 가지기 때문이다 [53,54]. 따라서 이상적으로 패턴에 수직입사가 아니라 일정한 약간의 각도를 가지고 입사하게 되고 기관까지 **tilt** 가 되어 있기 때문에 시뮬레이션에서 확인한 **sputter yield** 의 **maximum** 이 생기는 입사각의 각도와 일치하지 않는 것이다. 또 다른 변수가 있다면 기관 회전에 관한 것이다. 시뮬레이션에 측정한 것은 기관이 회전한다는 변수는 고려되지 않았지만 실제 공정에서는 기관 자체적으로 회전하는 기능이 있기 때문에 **maximum etch rate** 이 생기는 각도는 약간의 차이가 발생하게 된다.

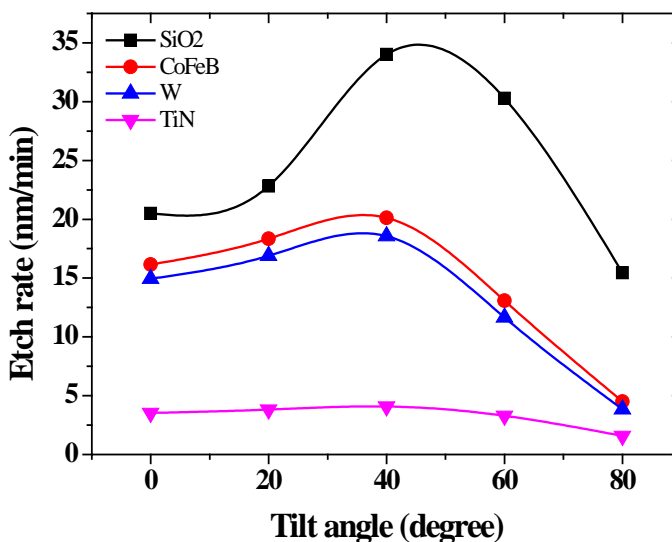


그림 5.6.33 기관 tilt 각도변화에 따른 다양한 물질들의 etch rate

## 5.8 요약 및 향후 과제

제 5 장에서는 MTJ layer 구성 물질들의 식각 특성에 대하여 살펴보았다. MTJ layer 는 차세대 뉴 메모리로서 개발중인 MRAM 들어가는 핵심 layer 로써, 식각 공정에서 어려움을 겪고 있다. MTJ layer 구성물질들은 다양한 금속물질들로 구성이 되어 있는데 non-volatile 한 특성 때문에 식각 후에 생기는 byproducts 들이 패턴의 옆면에 redeposition 되고, 이로 인해 소자는 정상적으로 동작할 수 없다. 이를 해결하고자 다방면으로 연구가 많이 진행되고 있다.

우선, 본 연구에서는 MTJ layer 구성물질들에 대해 식각 특성을 얻고자 하였다. 간단한 시뮬레이션을 통하여 여러 물질들의 입사각에 따른 sputter yield 를 측정하였다. 시뮬레이션뿐만 아니라 RIE type etcher 인 ICP 와 M-ICP 플라즈마 식각 장치에서 CoFeB, Ta, TiN, W, SiO<sub>2</sub> 의 식각 특성을 살펴보았다. M-ICP 에서 얻은 etch rate이 ICP 에서 측정된 etch rate 보다 높은 것을 확인 할 수 있었다. 이러한 현상은 M-ICP 에서는 낮은 이온 에너지로 식각함에도 불구하고 열 배 이상 높은 ion flux 로 인해 나타나는 현상이었다. 두 챔버는 각기 다른 이온 에너지 영역으로 식각이 진행되었는데, 다른 에너지 영역에 따라 식각시간에 따라 생기는 facet 각도에도 큰 차이를 보이고 있었다. ICP 에서 생기는 facet 각도는 약 60 도 정도로써, 약 30도 미만을 보이고 있는 M-ICP 에서 생기는 facet 각도보다 높은 각도를 형성하고 있었다. 이러한 facet 의 각도 차이는 패턴의 측면에 붙는 redeposition 양의 차이를 유발 할 수 있다. Facet 각도에 따라 이온의 입사각이 다르게 되며, 입사각의 차이에 따라 식각후에 생기는 sputtered atoms 들의 분포와 양이 달라지게 된다. 이로 인해, facet 각도가 낮은 것이 mask 에서 발생한 sputtered atoms 들이 반대편 측면에 redeposition 되는 양을 줄일 수 있게 된다. 하지만, redepositon 되는 것이 오로지 mask 에서만 발생하는 것이 아니다. 식각되는 물질이 non-volatile 한 특성이 있기 때문에 낮은 facet 각도로 인해 mask 에서 식각되는 물질이 redeposition 되는 것은 줄일

수 있어도 100% 막지는 못한다. RIE type 식각 장치에서는 이와 같은 한계가 발생하기 때문에 이온 빔 식각 장치에서 MTJ layer 물질들을 식각 하였다.

M-ICP 이온 빔 식각 장치는 ICP 이온 빔 식각 장치에 비해 높은 ion flux 와 etch rate 을 얻을 수 있다는 것을 3장과 4장에서 자세히 살펴본 바가 있다. 이를 응용하여 MTJ layer 구성물질들을 식각 하였다. 이온 빔 식각 장치는 여러 개여 특성을 가지고 있지만 세가지 정도로 요약할 해 볼 수 있다. 첫째는 식각 mechanism 이다. RIE type etcher 와는 다르게 이온 빔 식각 장치는 sputter etching 으로서 물질을 식각 한다. 둘째는, screen grid 전압을 control 함으로써 이온 에너지를 control 할 수 있지만, ion flux 를 증가시키기 위해서는 이온 에너지도 높아져야만 하는 특성이다. Etch rate 을 증가시키기 위해서는 이온 에너지와 ion flux 두 가지 변수를 증가시켜서 높일 수 있는데 일반적인 이온 빔 식각 장치는 두 개의 변수를 독립적으로 control 하지 못한다. 이로 인해, ion flux 를 높이기 위해서는 이온 에너지로 필연적으로 높아지게 되는데, 높은 이온 에너지로 식각하게 되면 식각되는 물질에 damage 를 유발시킨다. 미세한 nano-structure 를 가지는 소자의 경우 ion damage 는 소자의 성능에 심각한 이슈를 유발시킨다. 세번째 특성은 기판 tilt 의 기능이다. 기판을 tilt 함으로써 입사되는 이온들의 입사각을 변화시킴으로써 etch rate 을 변화시킬 수 있을 뿐만 아니라 패턴의 측면에 입사시켜 의도적으로 측면 식각을 할 수 있다. 이와 같은 기본적인 특성을 가지는 이온 빔 식각 장치에 discharge 주변에 자기장을 인가함으로써 두번째 특성을 개선한 것이 M-ICP 이온 빔 식각 장치이다. 이를 이용하여 MTJ layer 구성물질 중에서 CoFeB, TiN, W, SiO<sub>2</sub> 의 식각 특성에 대해 살펴보았다. 우선, 이온 에너지의 가변에 따른 식각 특성에 대하여 살펴보았다. 이온 에너지에 따라 etch rate 은 증가하는 것이 확인되었으며 TiN 의 경우에는 200eV 보다 큰 에너지는 되어야 식각이 되는 것을 확인 할 수 있었다. 또한, 기판 tilt 각도 변화에 따른 식각 특성도 살펴보았다. 기판 tilt 가 되면, 이온이 입사할 때 마스크 높이에 가려져 식각이 되지 않는 부분이 발생하게 되는데

이를 보완하고자 기판 자체적으로 회전하는 기능이 추가 되어야만 한다.  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{CoFeB}$ ,  $\text{W}$ ,  $\text{TiN}$  의 물질들에 따라 약간의 차이는 존재하지만, 기판이 40 도 정도 tilt 되었을때 가장 높은 etch rate 을 얻을 수 있었다. 하지만 etch rate 이 극도로 낮은  $\text{TiN}$  의 경우에는 기판 tilt 각도 변화에 따른 etch rate 변화에는 큰 차이가 없었다. Profile 의 변화를 보면, RIE type 에서 식각 한 결과와 다르게, 측면에 redeposition 이 거의 없는 것을 확인 할 수 있었다. Etch rate 이 RIE type 플라즈마 식각장치와 비교해서 낮음에도 불구하고 측면에 redeposition 되는 현상을 해결할 수 있는 특성 때문에 이온 빔 식각장치는 MTJ layer 식각함에 있어 큰 장점을 가지고 있다.

본 연구에서는 MTJ layer 구성물질들에 대해 RIE type 플라즈마 식각 장치와, M-ICP 이온 빔 식각 장치에서 각각 식각 특성을 분석 및 비교해보았다. 하지만 여러 물질들의 식각 특성을 얻은 연구 데이터를 기반으로 완성된 MTJ layer 식각에는 응용하지 못한 한계점이 분명히 있다. 각각의 물질들에 의한 식각 특성을 얻었을지라도 여러물질들을 적층해놓은 구조에서는 다른 이슈가 분명히 생길 수 있기 때문이다. 향후에는 여러물질들이 적층된 MTJ layer 패턴에서 식각 실험을 진행하여 직접 소자제작을 함으로써 식각 공정의 이슈에 공헌할 수 있는 연구가 되도록 해야 할 것이다.



## 제 6 장 결 론

전자산업이 발달하고 사용분야가 광범위해짐에 따라 반도체 산업에서도 기존에 사용되던 메모리 외에 뉴 메모리 개발의 필요성이 대두되고 있다. 이에 따라 PRAM, MRAM, ReRAM 등에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 특히나 MRAM 은 메모리가 갖춰야 할 모든 특성을 갖춘 이상적인 소자라 평가를 받고 있다. 그러나, 현재 산업에서는 MRAM 에서 핵심역할을 하는 MTJ layer 의 식각 공정의 어려움으로 인해 MRAM 개발이 지연되고 있다. 이에 본 논문에서는 MTJ layer 식각에 주로 사용되고 있는 것이 이온 빔 식각 장치라는 것에 착안하여 M-ICP 이온 빔 식각 장치를 새롭게 설계 및 구성하였다. M-ICP 이온 빔 식각 장치의 기본적인 특성을 측정할 수 있는 실험을 하여 ICP source 기반의 이온 빔 식각 장치와 비교 분석하였다. 또한, 대면적 공정을 위한 균일도 특성 개선을 위해 이온 빔 식각 장치 내에 있는 그리드를 새롭게 설계 하였으며 실험적인 입증을 통해 이를 차세대 이온 빔 식각 장치로서 활용 할 수 있는지 살펴보았다.

먼저, 고밀도 플라즈마를 확보하기 위해 이온 빔 식각장치의 discharge chamber 주변에 자기장을 인가하였다. 자기장의 공간분포를 면밀히 살펴보고 전자석 위치를 정하기 위해 FEMM 시뮬레이션을 활용하였다. 시뮬레이션을 통하여 전자석의 위치, 보빈의 반경, 전류의 방향 및 크기등을 설계할 수 있었다. M-ICP source 의 특성을 살펴보기 위해 discharge chamber 에서 플라즈마 밀도 및 전자온도를 측정하였다. R-wave 전파로 인해 플라즈마가 heating 되는 시스템으로 인하여 본 연구에 장비에서는 최적점의 자기장 인가 크기가 존재하였다. 이는 R-wave 파장과 세로축 방향의 discharge chamber 크기에 의해 좌우 되는 것으로써 본 연구에서 사용된 discharge chamber 크기가 달라지게 되면 플라즈마 밀도가 maximum 이 되는 자기장의 크기는 달라질 것이다. Discharge chamber 내에서의 플라즈마 밀도는 그리드를 통과해 기관으로 입사하는 ion

flux 의 양과 밀접한 관련이 있기 때문에 상당히 중요한 부분이다. 고밀도 플라즈마를 얻음으로써 기관에서는 높은 ion flux 를 얻을 수 있다. 플라즈마의 특성은 자기장의 가변뿐만 아니라 RF source power 에 의해서도 좌우될 수 있다. 이에 따라 RF source power 의 가변에 의한 플라즈마 및 ion flux 특성을 측정하였다. Source power 를 지속적으로 증가시키기에 따라 플라즈마 밀도 역시 비례하여 증가하였다. 그러나 지나치게 높은 플라즈마 밀도는 ion flux 를 defocus 하는 현상을 초래하게 되며 기관에서 측정되는 ion flux 는 감소하게 된다. 플라즈마 밀도의 증가는 sheath 두께를 얇게 만들며 스크린 그리드의 구멍의 지름과 비교하여 지나치게 sheath 가 얇아지게 되면 그리드에 생기는 sheath 가 오목하게 형성된다. 스크린 그리드의 구멍을 기준으로 discharge chamber 내로 들어가는 볼록한 sheath 가 형성되면 beam focus 가 원활하게 되지만, 오목한 sheath 가 형성되면 ion beam 는 발산하게 되어 기관에서 측정되는 ion flux 의 양은 적어지게 된다. 이온 빔 식각 장치 내에는 두개의 그리드 (screen grid, accelerator grid) 가 존재하는데 두 그리드의 역할에 대해서도 고찰해보았다. 이온 에너지의 크기를 결정하는 것은 스크린 그리드에 인가된 전압이며, 두개의 그리드에 인가된 절대적인 전압 차이에 의해 플라즈마와 스크린 그리드 사이에 생기는 sheath 두께도 결정되게 된다. 따라서 두 그리드에 인가된 전압의 차이가 적정 전압 이하로 되면 beam defocus 로 인해 그리드 표면으로의 이온 손실이 많다. 이에 따르는 손해는 그리드에 연결된 power supply 에서 측정되는 전류의 양으로 간단하게 확인해 볼 수 있다. Focus 가 적절하게 되지 않으면 accelerator grid 에 흐르는 전류가 증가하게 되며 이 때, 기관에서 ion flux 를 측정하면 상당히 적은 양으로 측정되었다. 즉, 그리드를 통해 플라즈마 내에 있는 ion 들을 추출해내는데, 스크린 그리드에서 적절하게 sheath 가 형성되지 않으면 accelerator 그리드에 상당수가 충돌하여 기관으로 입사하는 이온들의 양이 적어지게 되는 것이다.

M-ICP 이온 빔 식각 장치의 기본적인 특성에 대한 고찰 한 후에, ion beam

의 고질적인 단점이라고 할 수 있는 균일도 개선에 초점을 맞춰 보았다. 일반적인 이온 빔의 분포는 discharge chamber 에서 생성되는 플라즈마의 밀도 구배와 더불어 중간에 그리드가 존재하기 때문에 그리드 구멍에서 일정 각도의 beam divergence 에 의존한다. 이와 같은 두가지 요인으로 인해, 기판에서 측정되는 ion flux 의 균일도는 상당히 떨어지게 된다. 이를 개선하고자 discharge chamber 주변에 인가된 자기장의 구배를 변화시켜 보았다. 스크린 그리드 중앙을 중심으로부터 가장자리로 갈수록 magnetic flux density 가 감소하는 자기장의 구배가 되면, flute instability 현상으로 인해 플라즈마 밀도의 균일도 특성이 poor 하게 된다. Flute instability 현상이 생기지 않도록 하기 위해서는 반경방향이 증가함에 따라 magnetic flux density 도 증가를 하도록 자기장 구배를 만들어줘야만 한다. 자기장 구배 변화를 통해 discharge chamber 내의 플라즈마 균일도 특성에 대하여 살펴 보았지만 기판에서 측정되는 ion flux 균일도 개선에는 한계를 보이고 있었다. 이와 같은 한계성을 보이는 ion flux 균일도의 추가 개선을 위해 screen grid 및 accelerator grid 를 새롭게 설계하였다. 새롭게 설계한 그리드는 세가지 영역으로 나뉘어져 있으며 그리드 가장자리로 갈수록 구멍의 밀도가 증가하는 형태로 디자인 되어있다. 플라즈마 밀도가 떨어지는 영역은 그리드 구멍의 밀도를 높여줌으로써 ion flux 를 증가시키고자 하는 의도이다. 이와 같은 의도로 새롭게 제작된 그리드를 사용하게 되면 ion flux 의 균일도가 큰 폭으로 개선 되는 것을 확인 할 수 있었다. 이 뿐만 아니라 식각 실험도 추가적으로 하여 etch rate 균일도 또한 측정해보았으며, 이 또한 큰 폭으로 균일도 개선이 이뤄진 것을 확인해 볼 수 있었다.

한 편, 본 연구에서 설계한 M-ICP 이온 빔 식각 장치를 이용하여 MTJ layer 구성물질들에 대한 식각 특성을 살펴보았다. 선행적으로 MTJ layer를 구성하는 여러가지 물질들에 대해 이온의 입사각에 따른 sputter yield 를 살펴보기 위해 SRIM 시뮬레이션으로 간단히 살펴보았다. 금속물질 보다는 dielectric 물질들이 이온의 입사각에 대한 의존성이 큰 것으로 측정되었으며 metal 물질들의

sputter yield 가 일반적으로 더 낮게 측정되었다. 실제 식각 실험에서는 M-ICP 이온 빔 식각 장치에서 여러가지 물질들의 식각 특성을 살펴보기에 앞서, ICP 및 M-ICP 플라즈마 식각 장치에서도 MTJ layer 구성물질들의 식각 특성을 살펴보았다. 식각 공정에서 일반적으로 널리 사용되고 있는 RIE type etcher 와 M-ICP 이온 빔 식각장치를 비교분석 하기 위해서이다. ICP 및 M-ICP 플라즈마 식각 장치에서는 식각에 사용되는 이온 에너지의 차이에 따라 패턴에 생기는 facet 각도에 큰 차이를 보이고 있었다. M-ICP 플라즈마 식각 장치에서의 facet evolution 을 살펴본 결과, ICP 에서 실험한 결과 대비 상당히 낮은 각도의 facet 각도를 볼 수 있었다. 낮은 facet 각도는 패턴의 측면에 붙은 redeposition 의 양을 상당부분 줄일 수 있는 조건이 된다. Redeposition 은 식각되는 물질들인 MTJ layer 구성물질들이 non-volatile 한 특성을 가지고 있기 때문이기도 하지만 mask 의 패턴에 의해서도 생기는 현상이기 때문이다. 이에 따라 facet 각도가 높으면 이온의 입사각에 변화를 가져오게 되고, 결과적으로 다른 패턴의 측면쪽으로 상당부분 sputtered atoms 들이 redeposition 된다. 따라서 이와 같은 현상으로 인해 redeposition 되는 양을 줄이기 위해서는 facet 각도가 낮을 필요성이 있다. M-ICP 플라즈마 식각 장치에서 식각한 결과는 profile 로써 장점으로 보면, 낮은 facet 각도를 가지게 되고 선행연구로써 잘 알려진 바와 같이 낮은 에너지를 가짐에도 불구하고 높은 ion flux 로 인해 ICP 대비 높은 etch rate 을 얻을 수 있다. 하지만 이와 같은 장점들이 있지만 MTJ layer 를 구성하는 물질들의 non-volatile 한 특성으로 인해 RIE type etcher 에서는 redeposition 되는 것을 완전히 제거하는 것에는 한계성을 가지고 있다. 이에 따라 최근에는 이온 빔 식각 장치를 이용하여 MTJ layer 식각에 많이 이용하고 있으며 RIE type etcher 와 식각 특성을 비교분석 하기 위해 M-ICP 이온 빔 식각 장치에서도 MTJ layer 물질들에 대한 식각 특성을 살펴보았다. 이온 에너지를 가변시켜 봄으로써 여러가지 물질들의 etch rate 을 살펴보았으나 RIE type etcher 에 비해 식각 메커니즘이 단순하기 때문에 etch rate 은 M-ICP 플라즈마 식각 장

치보다는 떨어지는 특성을 보이고 있었다. 그러나 기판 tilt 각도에 따라 식각 특성을 분석한 결과 MTJ layer 의 가장 큰 이슈인 측면 redeposition 이 크게 줄어든 것을 볼 수 있었다. 기판 tilt 각도에 따라 각 물질마다 etch rate 에도 변화가 생겼으며, 더 중요한 점은 기판 tilt 를 시킴에 따라 측면에 redeposition 되어 나타나는 profile 양상이 달라졌다는 점이다. 이와 같은 장점들 때문에 etch rate 은 조금 낮을지라도 이온 빔 식각 장치가 MTJ layer 식각에 널리 사용되고 있다.

본 연구에서는, 기존에 사용되고 있는 이온 빔 식각 장치가 아니라 제안된 컨셉을 이용하여 M-ICP 이온 빔 식각 장치를 새롭게 설계하였다. 이를 이용하여 장비 자체적으로 다양한 특성들을 분석 및 고찰하였으며 이와 더불어 대면적 공정을 위한 균일도 향상의 가능성도 새롭게 제시하였다. 또한 추가적으로 MTJ layer 를 구성하는 물질들에 대한 식각 특성에 대한 실험도 RIE type 식각 장치들과 본 연구에 사용된 M-ICP 이온 빔 식각 장치를 비교 분석함으로써 본 실험에 사용된 장비에 대해 non-volatile 한 byproducts 가 생성되는 식각 공정에서의 장점을 확인할 수 있었다. 본 논문은 학술적인 측면에서 살펴보게 되면, 기존에 발표된 바 있는 M-ICP source 특성을 이용하여 이온 빔 식각 장치를 새롭게 구성하여 플라즈마 밀도 분포 및 균일도 특성을 심도 있게 관찰하고 이해했다는 것에 1차적인 의의가 있다. 또한, 자기장 구배의 변화를 통해 플라즈마 밀도 분포를 개선했음에도 불구하고 기판에서의 ion flux 및 etch rate 의 균일도 개선에는 한계를 보이고 있었지만 그리드를 새롭게 설계 함으로 인해 큰 폭으로 기판에서의 ion flux 및 etch rate 균일도를 향상시켰다는 것에 2차적인 의의가 있다. 산업적인 측면에서는 MTJ layer 식각 공정을 하기 위한 대안을 제시했다는 것에 1차 적인 의의가 있으며 더 나아가 낮은 이온 에너지를 사용함에도 불구하고 높은 ion flux 를 얻을 수 있고 새롭게 제작한 그리드를 이용하여 M-ICP 이온 빔 식각 장치를 사용하게 되면 wafer 수율 향상에도 크게 기여할 수 있는 가능성을 제시했다는 점에서 2차적인 의의가 있다.

## 참고 문헌

- [1] F. F. Chen, *Introduction to Plasma Physics and Controlled Fusion*, vol.1: Plasma Physics, 2<sup>nd</sup> Ed. Plenum Press, New York and London, Chap. 1 (1984)
- [2] A. Von Angel, *Ionized Gases*, Oxford University Press (1965)
- [3] 최경철, “비방전 보조 펄스를 이용한 직류 플라즈마 디스플레이 채널의 특성”, 서울대학교 대학원 공학박사 학위논문 (1993)
- [4] Larry F. Weber, *IEEE Trans. Plasma Sci.*, Vol. 34, No.2, april (2006)
- [5] V. E. Golant, V. I. Fedrov, *RF Heating in Toroidal Fusion Devices*, Plenum Press, New York (1989)
- [6] 이홍식, “JET 플라즈마의 ICRH에 의한 공명 이온 가열에 관한 연구”, 서울대학교 대학원 공학박사 학위논문 (1990)
- [7] Benjamin W. Longmie, Jared P. Squire, Chris S. Olsenr, Leonard D. Cassady, Maxwell G. Ballenger, Mark D. Carter, Andrew V. Ilin, Tim W. Glover, Greg E. McCaskill, Franklin R. Chang Díaz and Edgar A. Bering, *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 30, No. 1, January-February (2014)
- [8] K. Terasaka, S. Yoshimura, K. Ogiwara, M. Aramaki and M. Y. Tanaka, *Physics of Plasmas*, Vol. 17, No. 7, pp.072106 (2010)
- [9] W. Kratschmer et al., *Nature*, **170**, pp. 167 (1990)
- [10] A. Grill, *Cold Plasma in Material Processing*, IEEE Press, New York (1993)
- [11] A. M. Voshchenkov, *J. Vac. Sci. Technol. A* 11 (4), pp. 1211 (1993)
- [12] D. L. Smith, *Thin-Film Deposition Principles & Practice*, McGraw-Hill (1995)
- [13] 태홍식, “초고진공 전자 싸이클로트론 공명 플라즈마 화학 기상 증착에 의한 저온 실리콘 단결정 성장 특성에 관한 연구”, 서울대학교 대학원 공학박사 학위논문 (1990)
- [14] Sun P, Wang R, Tong G, Zhang J, Fang J. *Second International Conference on Plasma*

- Medicine*. San Antonio, Texas, USA (2009)
- [15] M. A. Lieberman and A. J. Lichtenberg, *Principles of Plasma Discharges and Materials Processing*, 2<sup>nd</sup> Ed. John Wiley & Sons, New Jersey, pp. 9, 176 (2005)
  - [16] S. M. Rossmagel, J. J. Cuomo and W. D. Westwood, *Handbook of Plasma Processing Technology*, Noyes Publications. (1990)
  - [17] L. Mader and J. Hoepfner, *J. Electrochem. Soc.*, Vol. 123, No. 12 (1976)
  - [18] Myoung-Jae Lee, Chang Bum Lee, Dong Soo Lee, Seung Ryul Lee, Man Chang, Ji-Hyun Hur, Young-Bae Kim, Chang-Jung Kim, David H. Seo, Sunae Seo, U-In Chung, In-Kyeong Yoo and Kinam Kim, *Nature Mater*. Vol. 10, August (2011)
  - [19] B. N. Engel, J. Åkerman, B. Butcher, R. W. Dave, M. DeHerrera, M. Durlam, G. Grynkewich, J. Janesky, S. V. Pietambaram, N. D. Rizzo, J. M. Slaughter, K. Smith, J. J. Sun, and S. Tehrani, *IEEE Trans. Magn.*, Vol. 41, No. 1, January (2005)
  - [20] A. V. Khvalkovskiy, D. Apalkov, S. Watts, R. Chepulskii, R. S. Beach, A. Ong, X. Tang, A. Driskill-Smith, W. H. Butler, P. B. Visscher, D. Lottis, E. Chen, V. Nikitin and M. Krounbi, *J. Phys. D: Appl. Phys.* 46, 139601 (2013)
  - [21] Kangho Lee and Seung H. Kang, *IEEE Trans. Magn.*, Vol. 47, No. 1, January (2011)
  - [22] Y. Shin, *Proc. Symp. VLSI Circuits*, pp. 156-159, Jun. (2005)
  - [23] W. J. Gallagher, S. S. P. Parkin, Yu Lu, X. P. Bian, A. Marley, K. P. Roche, R. A. Altman, S. A. Rishton, C. Jahn, T. M. Shaw, and Gang Xiao, *J. Appl. Phys.* 81, 3741 (1997).
  - [24] Tomonori Mukai, Butsurin Jinnai, Yoshiyuki Fukumoto, Norikazu Ohshima, and Hiromitsu Hada and Seiji Samukawa, *J. Appl. Phys.*, 102, 073303 (2007)
  - [25] Ho-Jun Lee, Il-Dong Yang and Ki-Woong Whang, *Plasma Sources Sci. Technol.*, 5 pp.383-388 (1996)
  - [26] S. S. Kim, C. S. Chang, N. S. Yoon and K. W. Whang, *Phys. Plasmas*, Vol. 6, 2926 (1999)
  - [27] S. H. Song, Y. Yang, P. Chabert and Mark J. Kushner, *Phys. Plasmas* 21, 093512 (2014)
  - [28] 염근영, *플라즈마 식각 기술*, 미래컴 (2006)

- [29] H Abe, M Yoneda and N Fujiwara, *Jpn. J. Appl. Phys.* **47**, pp. 1435 (2008)
- [30] 김홍습, “Etch 장비 기술 동향”, *반도체 산업*, 제 **12**월호, pp. 34-36 (2011)
- [31] R. H. Bruce and A. R. Reinberg, *Proc. 2<sup>nd</sup> Symp. Dry Process*, pp. 131 (1980)
- [32] L. M. Ephrath and E. J. Petrillo, *J. Electrochem. Soc.*, Vol. 129, No. 10 (1982)
- [33] K. Ono, T. Oomori, M. Tuda and K. Namba, *J. Vac. Sci. Technol. A* **10**, pp. 1071 (1992)
- [34] D. Cheng, D. Maydan, S. Somekh, K. R. Stalder, D. L. Andrews, M. Chang, J. M. White, J. Y.Wong, V. J. Zeitlin, and D. N.Wang, U.S. Patent No. 5,215,619.
- [35] Toshiro Ono, Masatoshi Oda, Chiharu Takahashi and Seitaro Matsuo, *J. Vac. Sci. Technol. B*, **4**, 696 (1986)
- [36] A. K. Quick, R. T. S. Chen and N. Hershkowitz, *J. Vac. Sci. Technol. A*, **14**, 1041 (1996)
- [37] J. Hopwood, C. R. Guarinieri, S. J. Whitehair and J. J. Cuomo, *J. Vac. Sci. Technol. A* **11**, pp. 147 (1993)
- [38] W. H. Lee, H. W. Cheong, J. W. Kim and K. W. Whang, *Plasma Sources Sci. Technol.*, **24**, 065012 (2015)
- [39] 한국 전자 통신연구소, “고밀도 건식 식각기술에 관한 연구(최종보고서)” (2000)
- [40] Tsai W, Mueller G, Lindquist R, Frazier B and Vahedi V, *J. Vac. Sci. Technol. B* **14**, pp. 3276 (1996)
- [41] M. A. Lieberman, J. P. Booth, P Chabert, J. M. Rax and M. M. Turner, *Plasma Sources Sci. Technol.* **11**, pp. A283 (2002)
- [42] Nishant Sirse, Cleo Harvey, Cezar Gaman, Bert Ellingboe, 69<sup>th</sup> Annual Gaseous Electronics Conference Volume 61, Number 9, Bochum, Germany (2016)
- [43] M. H. Jeon, S-K. Kang, J. Y. Park and G. Y. Yeom, *J. Korean phys. Soc.* Vol. 59, No. 5, Nov. (2011)
- [44] V. Georgieva, A. Bogaerts, and R. Gijbels, *Phys. Rev. E*, **69**, 026406 (2004)
- [45] 도현호, “전자 회전 공명 플라즈마 식각 장치에서의 산화막 식각 특성 및 식각 구조에 관한 연구”, 서울대학교 대학원 공학박사 학위논문 (1997)



- [46] 이호준, “자화 유도 결합 플라즈마의 건식 식각 특성에 관한 연구”, 서울대학교 대학원 공학박사 학위논문 (1996)
- [47] 김혁, “다양한 진단 방법을 이용한 약자장이 걸린 유도 결합 플라즈마에 대한 연구”, 서울대학교 대학원 공학박사 학위논문 (2013)
- [48] B. E. Cherrington, *Gaseous Electronics and Gas Lasers*, Pergamon Press (1979)
- [49] 이우현, “약 자장이 인가된 유도 결합 플라즈마의 특성과 응용에 관한 연구”, 서울대학교 대학원 공학박사 학위논문 (2015)
- [50] N. A. Krall and A. W. Trivelpiece, “Principles of Plasma Physics”, McGraw-HILL (1973)
- [51] H. W. Cheong, W. H. Lee, J. W. Kim, W. S. Kim, and K. W. Whang, *Plasma Sources Sci. Technol.*, 23, 065051 (2014)
- [52] W. H. Lee, H. Kim, W. J. Park, W. S. Kim, D. H. Kim, J. W. Kim, H. W. Cheong and K. W. Whang, *J. Appl. Phys.* 117 173302 (2015)
- [53] G. Aston, H. R. Kaufman, and P. J. Wilbur, *AIAA J.* Vol. 16, 516 (1978)
- [54] G. Aston and H. R. Kaufman, *AIAA J.* Vol. 17, 64 (1979)
- [55] Y. Ohara, S. Matsuda, H. Shirakata and S. Tanaka, *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 17, No. 2 pp. 423-428 (1978)
- [56] P. G. Gloersen, *J. Vac. Sci. Technol.* Vol. 12, 28 (1975)
- [57] M. MingXiu, K. G. Stephens, B. J. Sealy and J. E. Mynard, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A* 288, pp. 303-307 (1990)
- [58] P. Y. Nabhiraj, R. Menon, G. M. Rao, S. Mohan, R. K. Bhandari, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A* 621 pp.57-61 (2010)
- [59] S. Matsuo and Y. Adachi, *Jpn. J. Appl. Phys.* Vol. 21, No. 1, pp. L4-L6 (1982)
- [60] S. Xuan, B. Costel, H. Robert and E. S. Earl, *Plasma Sources Sci. Technol.* 13 359-370 (2004)
- [61] W. C. Lathem, *Journal of Spacecraft and Rockets*, Vol. 6 1237 (1969)
- [62] A. Hassan, A. Elsaftawy, S. G. Zakhary, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A* 586 pp. 148-

- 152 (2008)
- [63] K. Kinoshita, H. Utsumi, K. Suemitsu, H. Hada and T. Sugibayashi, *Jpn. J. Appl. Phys.* 49 08JB02 (2010)
- [64] K. Sugiura, S. Takahashi, M. Amano, T. Kajiyama, M. Iwayama, Y. Asao, N. Shimomura, T. Kishi, S. Ikegawa, H. Yoda and A. Nitayama, *Jpn. J. Appl. Phys.* 48 08HD02 (2009)
- [65] S. Takahashi, T. Kai, N. Shimomura, T. Ueda, M. Amano, M. Yoshikawa, E. Kitagawa, Y. Asao, S. Ikegawa, T. Kishi, H. Yoda, K. Nagahara, T. Mukai, and H. Hada, *IEEE Trans. Magn.*, Vol. 42, No. 10, 2745 (2006)
- [66] S. W. Chun, D. H. Kim, J. H. Kwon, B. H. Kim, S. J. Choi and S. B. Lee, *J. Appl. Phys.* 111, 07C722 (2012)
- [67] Y. Ohsawa, N. Shimomura, T. Daibou, Y. Kamiguchi, S. Shirotori, T. Inokuchi, D. Saida, B. Altansargai, Y. Kato, H. Yoda, T. Ohkubo and K. Hono, *IEEE Trans. Magn.*, Vol. 52, No. 7, 3400803 (2016)
- [68] Y. Iba, A. Takahashi, A. Hatada, M. Nakabayashi, C. Yoshida, Y. Yamazaki, K. Tsunoda, and T. Sugii, *Symposium on VLSI Technol. Digest of Technical papers* (2014)
- [69] S. H. Jeong, T. S. Kim, K. W. Lee, D. H. Chang, S. R. In and Y. S. Bae, *Rev. Sci. Instrum.*, 85, 02B316 (2014)
- [70] K. Ikeda, Y. Takeiri, O. Kaneko, K. Nagaoka, Y. Oka, M. Osakabe, K. Tsumori, M. Sato, E. Asano, and T. Kawamoto, *Rev. Sci. Instrum.*, 75, 1744 (2004)
- [71] 김완수, “자화된 유도결합형 플라즈마에서 ACL 및 TSV 건식 식각 특성에 관한 연구” (2015)
- [72] 정희운, “대면적 공정을 위한 자화 유도 결합 플라즈마 장치의 설계 및 공정 특성에 관한 연구” (2014)
- [73] davod K. Cheng, *Field and Wave Electromagnetics*, 2<sup>nd</sup> Ed. ADDISON-WESLEY, Chap. 6, (1989)
- [74] [http://en.wikipedia.org/wiki/Finite\\_element\\_method](http://en.wikipedia.org/wiki/Finite_element_method)

- [75] A. B. Mikhailovskii, Theory of Plasma Instabilities, Volume 2: Instabilities of an Inhomogeneous Plasma, Consultants Bureau, New York (1974)
- [76] Y. I. Sung, H. B. Lim and R. S. Houk, *J. Anal. At. Spectrom.*, vol. **17**, pp.565-569 (2002)
- [77] J. W. Coburn and E. Kay, *J. Appl. Phys.* **43**, 4965 (1972)
- [78] S. G. Ingram and N. S. J. Braithwaite, *J. Phys. D* **21**, 1496 (1988)
- [79] A. D. Kuypers and H. J. Hopman, *J. Appl. Phys.* **63**, 1894 (1988)
- [80] C. Bohm and J. Perrin, *Rev. Sci. Instrum.* **64**, 31 (1993)
- [81] G. D. Conway, A. J. Perry, and R. W. Boswell, *Plasma Sources Sci. Technol.* **7**, 337 (1998)
- [82] C. P. DeNeef and A. J. Theiss, *Rev. Sci. Instrum.* **50**, 6, pp. 378 (1979)
- [83] E. A. Edelberg, A. Perry, N. Benjamin, and E. S. Aydil, *J. Vac. Sci. Technol. A* **17**, 506 (1999)
- [84] H. M. Kudyan, *Rev. Sci. Instrum.* **49**, pp. 8-10. (1978)
- [85] U. Kortshagen, M. Zethoff, *Plasma Sources Sci. Technol.* **4**, pp. 541-550. (1995)
- [86] H. W. Cheong, W. H. Lee, J. W. Kim, K W Whang, H. Kim and W. J. Park, *J. Vac. Sci. Technol. A* **33**, 041304 (2015)
- [87] Itagaki N, Iwata S, Muta K, Yonesu A, Kawakami S, Ishii N and Kawai Y, *Thin Solid Films.* **435**, 259-263 (2003)
- [88] M. Zeuner, H. Neumann, F. Scholze, D. Flamm, M. Tartz and F. Bigl, *Plasma Sources Sci. Technol.* **7**, 252-267 (1998)
- [89] H. C. Lee, J. Y. Bang, C. W. Chung, *Thin Solid Films* **519** pp. 7009-7013 (2011)
- [90] H. C. Lee, H. J. Oh, C. W. Chung, *Plasma Sources Sci. Technol.* **21**, 035003 (2012)
- [91] Y. Lu, Y. Chen and Y. An, *Acta. Mech. Sin.* **25** pp.769-776 (2009)
- [92] S. Wang, X. Zhang, H. Wang, L. Liu, R. Zhou, S. Yang and D. Liu, *Adv. Mat. Res.*, 724-725, pp.686-691 (2013)
- [93] 정두용, 남창우, 이정호, 최대규, 원충연, *전력전자 학술대회 우수논문*, pp. 274-281 (2009)
- [94] P. Subramonium, M. J. Kushner, *J. Appl. Phys.* **96**, pp. 82-93 (2004)

- [95] 박완재, “응용 공정별 맞춤형 플라즈마 건식 식각에 관한 연구”, 서울대학교 대학원 공학박사 학위논문 (2012)
- [96] William Stallings, *Computer Organization and Architecture*, 8th Ed. (2010)
- [97] T. Kawahara, K. Ito, R. Takemura and H. Ohno, *Microelectron. Reliab.* 52, 613-627 (2012)
- [98] J. G. Zhu and C. D. Park, *Materials Today*, Vol. 9, 36-45 (2006)
- [99] R. C. Sousa and I. L. Prejbeanu, *C. R. Physique*, 6, 1013-1021 (2005)
- [100] J. C. Slonczewski, *J. Magn. Magn. Mater.*, 159, L1-L7 (1996)
- [101] S. Mitani, K. Tsukamoto, T. Seki, T. Shima and K. Takanashi, *IEEE Trans. Magn.*, Vol 41, No. 10 (2005)
- [102] S. Yuasa and D. D. Djayaprawira, *Phys. D: Appl. Phys.* 40 R337-R354 (2007)
- [103] Albert Fert *Rev. Mod. Phys.*, 80, No. 4, 1517-1530 (2004)
- [104] M. Aoki, H. Noshiro, K. Ysunoda, Y. Iba, A. Hatada, M. Nakabayashi, A. Takahashi, C. yoshida, Y. Yamazaki, T. Takenaga and T. Sugii, *VLSI Tech. Dig.*, 9-3 (2013)
- [105] C. D. W. Wilkinson and M. Rahman, *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A*, 362 (2004)
- [106] I. H. Lee, T. Y. Lee, C. W. Chung, *Vacuum*, 97, 49-54 (2013)
- [107] E. H. Kim, Y. B. Xiao, S. M. Kong, C. W. Chung, *Thin Solid Films*, 519, 8223-8228 (2011)
- [108] I. H. Lee, T. Y. Lee, S. M. Hwang and C. W. Chung, *Vacuum*, 101, 394-398 (2014)
- [109] T. Y. Lee, I. H. Lee and C. W. Chung, *Thin Solid Films*, 547, 146-150 (2013)
- [110] E. H. Kim, T. Y. Lee and C. W. Chung, *J. Electrochem. Soc.*, 159, H230-H234 (2012)
- [111] C. W. Chien, D. Y. Wang, K. H. Shen, S. H. Huang, K. M. Kuo, S. Y. Yang, Y. H. Wang, T. K. Ku and D. L. Deng, *IEEE. Elec. Dev. Lett.* Vol 34, No. 2 (2013)
- [112] X. Peng, S. Wakeham, A. Morrone, S. Axdal, M. Feldbaum, J. Hwu, T. Boonastra, Y. Chen and J. Ding, *Vacuum*, 83, 1007-1013 (2009)
- [113] James F. Ziegler, Jochen P. Biersack and Matthias D. Ziegler, *The Stopping and Range of Ions in Matter* (2008)

- [114] J. H. Jung, S. H. Lim and S. R. Lee, *J. Appl. Phys.*, 108, 113902 (2010)
- [115] H. W. Lehmann, L. Krausbauer and R. Widmer, *J. Vac. Sci. Technol.*, 14, 281 (1977)
- [116] A. P. Mahorowala and H. H. Sawin, *J. Vac. Sci. Technol B*, 20, 1077 (2002)
- [117] M. S. Kim, Y. Kim, M. S. Lee, Y. J. Park, S. I. Kim and S. K. Min, *J. Crystal Growth*, 139, 231-237 (1994)
- [118] G. Feng, Y. Fu, J. S. Xia, J. J. Zhu, B. S. Zhang, X. M. Shen, D. G. Zhao, H. Yang and J. W. Liang, *Phys. D: Appl. Phys.*, 35, 2731-2734 (2002)
- [119] P. W. Fok, R. R. Rosales and D. Margetis, *Phys. Rev. B*, 78, 235401 (2008)
- [120] Y. Yamamura, *Radiation effects*, Vol 55, pp. 49-56 (1981)
- [121] J. M. E. Harper, J. J. Cuomo, P. A. Leary, G. M. Summa, H. R. Kaufman and F. J. Bresnock, *J. Electrochem. Soc.*, Vol. 128, No. 5 (1981)
- [122] M. J. Forrestal, B. S. Altman, J. D. Cargile and S. J. Hanchak, *Int. J. Impact Engng.*, Vol. 15, No. 4, pp. 395-405 (1994)
- [123] G. Brauchle, S. Richard-Schneider, D. Illig, R. D. Beck, H. Schreiber, M. M. Kappes, *Nucl. Instr. And Meth. In Phys. Res. B*, 112, 105-108 (1996)
- [124] A. F. Burenkov, F. F. Komarov and S. A. Fedotov, *Nucl. Instr. And Meth. In Phys. Res. B*, 67, 30-34 (1992)

## Abstract

# Design of Ion Beam Etcher applying Magnetized Inductively Coupled Plasma and a Study on etch characteristics of MTJ layer materials

Ji-Won Kim

Department of Electrical and Computer Engineering

The Graduate School

Seoul National University

In recent years, various electronic devices are required to be able to process a massive information and data so the development of the next generation memory devices with high speed, high density, low power consumption, non-volatile is essential. However, current dynamic random access memory (DRAM) and flash memories seem to face their limits soon. Thus, intensive studies have been conducted to develop alternative non-volatile new memory devices such as the phase random access memory (PRAM), Magnetic random access memory (MRAM), resistive random access memory (ReRAM) and so on. Among a variety of emerging candidate for the next generation memory devices, spin-transfer torque (STT) MRAM has many advantage including high density, fast speed, low power consumption and high endurance. So, STT-MRAM has the potential probability for variation of memory hierarchy system in computer architecture. In this regard, STT-MRAM has been studied in terms of material optimization in magnetic tunneling junction (MTJ) layer, electric characteristics in devices and etch processing of MTJ layer. Among a variety of researching issue for development of STT-MRAM devices, we have studied etch processing of MTJ layer in STT-MRAM devices. MTJ layer in MRAM devices, which is

the key layer for read/write memory, consists of a dielectric layer and different kinds of metal layers, such as CoFeB, W, Ru, Ta, FePt, CoFe, PtMn, TiN and so on. Generally etch processing in RIE type etcher, etch byproducts generated from metal layers during the etch process are non-volatile and are redeposited onto the MTJ sidewall, which leads to breakdown of STT-MRAM devices. In this regard, redeposited material at sidewall of MTJ layer must be removed for the accurate operating performance of devices. To solve the issue in etch processing, ion beam etcher (IBE) is used because IBE are usually etched by tilting and rotating the substrate to remove the byproducts deposited on the sidewall by physical sputtering. Nevertheless, IBE has the some issues such as long processing time owing to the poor etch rate and uncontrollable ion energy with ion flux. Moreover, IBE tend to run into trouble in large-area processing because of the difficulty in having uniform ion beam intensity distribution.

In this thesis, a variety of research have been studied to improve the fundamental characteristics of conventional IBE. We proposed newly designed IBE with magnetized inductively coupled plasma (MICP) to control ion energy and ion flux independently and improve the etch rate. The MICP source is known to generate the high density plasma based on R-wave heating mechanism theory. In this research, a diameter of each electromagnet and the distance between the electromagnet and the discharge chamber were determined based on FEMM simulation which is a free software tool for the analysis of the spatial distribution of magnetic fields. After designing MICP-IBE, we investigated discharge and ion beam characteristics with respect to the magnitude of magnetic flux density, RF source power and grids voltage. The plasma density increase according to the increasing magnitude of magnetic flux density and RF source power, it has the maximum point at specific condition. Also, increasing plasma density leads to the improvement of magnitude of ion flux. Moreover, the correlation between plasma density and ion beam focusing was investigated in terms of the sheath formation on the screen grid hole. To obtain the

maximized ion beam flux, the sheath formation must be the proper convex shape. In addition, the sheath shape and thickness were determined by the difference between screen grid and acceleration grid voltage. In other words, the magnitude voltage of grids is very important factor to get the maximum ion beam performance. The screen grid voltage and acceleration grid voltage determine the ion energy and ion flux, respectively.

This research also investigates the uniformity characteristics of the plasma density, ion flux and etch rate in the MICP-IBE. First of all, we set up the additional electromagnet in order to configure various magnetic field configurations. The plasma density, ion flux and etch rate non-uniformity values were measured under various magnetic field configurations. The improvement of uniformity characteristics can be confirmed when a proper magnetic field condition which suppresses flute instability in plasma is satisfied. However, the variation of magnetic field configuration has limitations in improving the uniformity characteristics further because of the limitation coming from the geometry of the screen and acceleration grids. In this respect, we proposed a newly designed screen and acceleration grid that have different grid hole densities with radial distance from the grid center. The ion flux and etch rate uniformity characteristics with a conventional grid and newly proposed grid were compared. The CoFeB etch rate non-uniformity in the proposed grid (11.65%) was lower than that for the conventional grid (17.5%).

Meanwhile, the dry etching characteristics of various material which are CoFeB, Ta, TiN, W and SiO<sub>2</sub> in RIE type etcher and those in M-ICP IBE were investigated with a line and space patterned samples. In RIE type etcher, the difference in facet angle were confirmed between MICP etcher and ICP etcher. In MICP etcher case was measured lower facet angle was lower than ICP etcher owing to the different ion energy regions. The mask facet angle influences the direction of sputtered atoms. To reduce the redeposition after etching of mask, the mask facet angle must be as low as possible. However, the redeposited material on sidewall in line patterned cannot remove perfectly in RIE etcher so we carried



out the etch experiment in MICP-IBE to remove redeposited etch byproducts. Basically, the etch characteristics were investigated with respect to the ion energy variation. Furthermore, we carried out the experiment according to the tilt angle variation of the substrate. The maximum etch rate was measured at specific tilt angle condition and redeposited material was reduced according to increasing tilt of the substrate in MICP-IBE.

**Keywords : MICP-IBE (Magnetized Inductively Coupled Plasma Ion Beam Etcher), IED (Ion Energy Distribution), Ion flux, Etch rate, Uniformity, MTJ (Magnetic tunneling junction)**

**Student Number : 2012-20759**